



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**VODNÍ ELEKTRÁRNA SE ZOTLÖTEREROVOU
VÍROVOU TURBÍNOU**

HYDROELECTRIC POWER PLANT WITH ZOTLÖTERER VORTEX TURBINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Monika Drobná

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ZBYNĚK ZACHOVAL, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|-------------------------|---|
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby |
| Pracoviště | Ústav vodních staveb |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|-------------------------|---|
| Student | Monika Drobná |
| Název | Vodní elektrárna se Zotlötererovou vírovou turbínou |
| Vedoucí práce | doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D. |
| Datum zadání | 30. 11. 2016 |
| Datum odevzdání | 26. 5. 2017 |
| V Brně dne 30. 11. 2016 | |

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Povodí Moravy, s.p., 1979. Oslava km 35,680, Pilský jez – oprava. Projekt.

Holata, M., 2002. Malé vodní elektrárny. Academia. ISBN: 80-200-0828-4.

ČSN 75 2601, 2010. Malé vodní elektrárny – Základní požadavky. ÚNMZ, Praha.

ČSN EN 61116, 1997. Pravidla pro volbu technologických zařízení malých vodních elektráren. ÚNMZ, Praha.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rešerše materiálů o Zotlöttererově vírové turbíně.

Analýza možnosti energetického využití Pilského jezu.

Návrh vodní elektrárny s vírovou turbínou v lokalitě Pilského jezu.

Zhodnocení navrženého řešení.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce pojednává o možném využití hydroenergetického potenciálu na řece Oslavě v profilu Pilského jezu. V úvodu jsou uvedeny možnosti využití hydroenergetického potenciálu, dále je vybrána a popsána vhodná turbína pro lokalitu Pilského jezu a proveden návrh malé vodní elektrárny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Malá vodní elektrárna, Pilský jez, Zotlötererova vírová turbína, HEC-RAS, vír

ABSTRACT

The bachelor thesis shows possibilities of utilization of the hydroenergetic potential on the Oslava River in the place of Pilský weir. In the introduction there are presented possibilities of utilization of hydropower potential, than selected and described suitable turbine for this site and design of a small hydropower plant.

KEYWORDS

Small hydropower plant, Pilský weir, Zotlöterer turbine, HEC-RAS, vortex

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Monika Drobná *Vodní elektrárna se Zotlötererovou vírovou turbínou*. Brno, 2017. 62 s., 13 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Zbyněk Zachoval, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně, a že jsem uvedla všechny informační zdroje.

V Brně dne

.....

Monika Drobná

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala panu doc. Ing. Zbyňku Zachovalovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, ochotu, trpělivost a cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině za bezmeznou pomoc, podporu a trpělivost při studiu.

OBSAH

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | ÚVOD | 10 |
| 2 | CÍL PRÁCE A METODA ŘEŠENÍ | 15 |
| 3 | ROZDĚLENÍ VODNÍCH TURBÍN..... | 16 |
| 3.1 | ROZDĚLENÍ Z HLEDISKA ZPŮSOBU PŘENOSU ENERGIE | 16 |
| 3.2 | ROZDĚLENÍ Z HLEDISKA POLOHY HRÍDELE | 16 |
| 3.3 | ROZDĚLENÍ PODLE ORIENTACE PROUDĚNÍ | 16 |
| 3.4 | JEDNOTLIVÉ TYPY VODNÍCH TURBÍN..... | 17 |
| 4 | ZOTLÖTEREROVA VÍROVÁ TURBÍNA | 24 |
| 4.1 | PŘIVADĚČ..... | 28 |
| 4.2 | NÁDRŽ..... | 28 |
| 4.3 | ODPAD..... | 28 |
| 4.4 | PROVOZ | 28 |
| 4.5 | TYPIZACE..... | 28 |
| 4.6 | VÝHODY A NEVÝHODY | 30 |
| 4.7 | PŘÍKLADY POUŽITÍ..... | 30 |
| 4.7.1 | MVE v Dolním Rakousku | 30 |
| 4.7.2 | MVE ve Švýcarsku | 32 |
| 4.7.3 | MVE v Indonésii | 32 |
| 5 | NÁVRH VODNÍ ELEKTRÁRNY PILSKÝ JEZ | 36 |
| 5.1 | CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉ LOKALITY | 36 |
| 5.1.1 | Správní údaje | 36 |
| 5.1.2 | Geologické údaje | 37 |
| 5.1.3 | Hydrologické údaje | 37 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.1.4 | Koryto toku..... | 39 |
| 5.1.5 | Stávající stav jezu | 40 |
| 5.2 | HYDROTECHNICKÉ A HYDROENERGETICKÉ VÝPOČTY | 41 |
| 5.2.1 | Hydrotechnické výpočty..... | 41 |
| 5.2.2 | Hydroenergetické výpočty | 43 |
| 5.3 | NAVRŽENÉ TECHNICKÉ ŘEŠENÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY | 50 |
| 5.3.1 | STAVEBNÍ ČÁST | 50 |
| 5.3.2 | TECHNOLOGICKÁ ČÁST | 52 |
| 5.4 | VLIV STAVBY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ..... | 52 |
| 6 | ZÁVĚR A HODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ..... | 53 |
| 7 | LITERATURA..... | 54 |
| 8 | SEZNAMY | 57 |
| 8.1 | SEZNAM VELIČIN..... | 57 |
| 8.2 | SEZNAM ZKRATEK..... | 59 |
| 8.3 | SEZNAM TABULEK | 60 |
| 8.4 | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 60 |
| 9 | PŘÍLOHY..... | 62 |
| 9.1 | FOTODOKUMENTACE | 62 |
| 9.2 | VÝKRESY..... | 62 |

1 ÚVOD

Elektrická energie je základním faktorem pro rozvoj lidské společnosti. Lidstvo ji potřebuje pro práci i zábavu. Celosvětově v zemích OECD výroba elektrické energie za poslední dekádu stagnuje. [9]

V minulém století společnost začala využívat jadernou energii. Představuje prakticky nevyčerpatelný zdroj energie. Velkou nevýhodou je vznikající životu nebezpečný odpad. Při manipulaci s odpadem musí být dodržovány přísné bezpečnostní pokyny, při špatné manipulaci by mohlo dojít k fatálním následkům pro celou planetu. Problém kam s jaderným odpadem dodnes nemá řešení. Veškerý stávající jaderný odpad je uložen pouze v meziskladech, konečné úložiště jaderného paliva nikde na světě neexistuje.

Další zdroje energie představuje uhlí, ropa a zemní plyn. Jedná se o neobnovitelné zdroje energie způsobující znečištění životního prostředí. Při čerpání těchto zdrojů dochází k narušování krajiny, možnosti úniku ropy do moře, či zemního plynu do atmosféry.

Lidstvo je zahlceno odpady, proto se obrací k možnosti využití obnovitelných zdrojů k výrobě elektrické energie. Mezi obnovitelné nefosilní přírodní zdroje energie patří energie větru, energie slunečního záření, geotermální energie, energie vody, energie půdy, energie vzduchu, energie biomasy, energie skládkového plynu, energie kalového plynu a energie bioplynu. Nevzniká nebezpečný odpad a nezatěžuje prostředí. Tvoří 20 % světové výroby elektrické energie [5].

Vodní energie je nejstarší a přitom moderní, ekologický, levný, přirozeně se obnovující zdroj energie. Voda je nositelem tepelné, mechanické a chemické energie [5]. Důležitý faktor pro zachování klimatické rovnováhy planety je koloběh vody. Pomocí sluneční energie je voda odpařována ze zemského povrchu a z volné hladiny a následně kondenzuje v mracích, dále dopadá zpět na zemský povrch v podobě deště, kde se vsakuje do země nebo odtéká po povrchu.

Celková energie odtékající vody, udávaná většinou průměrnou hodnotou za kalendářní rok, se udává jako hydroenergetický potenciál vodního toku a je ovlivněna hydrologickými, topografickými a geologickými podmínkami. Tento potenciál však nelze vzhledem k energetickým ztrátám a nerovnoměrnosti rozložení podél toku plně využít.

Stejně jako jiné obnovitelné zdroje energie je i potenciálně využitelná energie vody geograficky nerovnoměrně rozdělena. Tab. 1.1 ukazuje rozdělení teoretického hydroenergetického potenciálu Země podle kontinentů a zohledňuje také poměr hydroenergetického potenciálu na ploše území. [5]

Tab. 1.1 Rozdělení teoretického hydroenergetického potenciálu Země [5]

| Světadíl | Hydroenergetický potenciál | Podíl na světových zásobách | Výkonová hustota |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | [TW] | [%] | [kW/ km ²] |
| Evropa | 0,24 | 6,4 | 25 |
| Asie | 1,34 | 35,7 | 30 |
| Afrika | 0,70 | 18,7 | 23 |
| Severní Amerika | 0,70 | 18,7 | 34 |
| Jižní Amerika | 0,60 | 16,0 | 33 |
| Austrálie | 0,17 | 4,5 | 19 |

V dnešní době se využívá jen 15-16 % technicky využitelného potenciálu [5]. I přesto technicky využitelný potenciál zajišťuje jednu pětinu z veškeré vyrobené elektrické energie ve světě. Některé vyspělé země s dostatečným hydroenergetickým potenciálem mohou tímto zdrojem pokrýt téměř veškerou spotřebu elektrické energie. Příkladem je Norsko, které vykazuje 99 % vyrobené elektrické energie z vodních elektráren, které tu například v roce 2008 vyrobily celkem asi 122,7 TWh [14].

Česká republika leží na rozvodí tří moří a pramení zde mnoho toků. Malé vodní elektrárny (MVE) jsou proto ideální možností pro využití hydroenergetického potenciálu. Technicky využitelný hydroenergetický potenciál pro Českou republiku je $P = 385$ MW [5]. V České republice se využívá něco přes 30 % potenciálu, tj. asi $A = 500$ GWh/rok [5]. Výrobu elektrické energie z vodních zdrojů a její podíl na celkové produkci elektrické energie v ČR ukazuje Tab. 1.2. Tab. 1.4 uvádí významné akumulaci a průtočné vodní elektrárny na řece Vltavě, které tvoří Vltavskou kaskádu. Jedná se o soustavu devíti

vodních děl. Šest děl je uvedeno v Tab. 1.4 s instalovaným výkonem nad 10 MW, zbývající tři mají instalovaný výkon pod 10 MW, tím spadají do kategorie MVE. Jedná se o Lipno II, Hněvkovice a Kořensko [32]. Další významná vodní díla jsou přečerpávací vodní elektrárny, které jsou používány pro pokrytí špičkových spotřeb energie (Tab. 1.3).

Tab. 1.2 Hrubá výroba elektrické energie v České republice [8]

| Rok | Výroba elektrické energie celkem | Výroba ve vodních elektrárnách | Podíl vodních elektráren |
|------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| | [GWh] | [GWh] | [%] |
| 2010 | 85 910,1 | 3 380,6 | 3,94 |
| 2011 | 87 560,6 | 2 835,0 | 3,24 |
| 2012 | 87 573,7 | 2 963,0 | 3,38 |
| 2013 | 87 064,9 | 3 761,7 | 4,32 |
| 2014 | 86 003,4 | 2 960,7 | 3,44 |
| 2015 | 83 888,3 | 3 070,8 | 3,66 |

Tab. 1.3 Významné přečerpávací vodní elektrárny v České republice [23]

| Přečerpávací vodní elektrárny | Instalovaný výkon | Zahájení provozu | Vodní tok |
|-------------------------------|-------------------|------------------|--------------|
| | [MW] | [rok] | |
| Štěchovice II | 45 | 1947 | Vltava |
| Dalešice | 480 | 1978 | Jihlava |
| Dlouhé Stráně I | 650 | 1996 | Divoká Desná |

Tab. 1.4 Významné akumulční a průtočné vodní elektrárny na Vltavě [33]

| Akumulační a průtočné vodní elektrárny | Instalovaný výkon | Zahájení provozu |
|---|--------------------------|-------------------------|
| | [MW] | [rok] |
| Lipno I | 2 × 60 | 1959 |
| Orlík | 4 × 91 | 1962 |
| Kamýk | 4 × 10 | 1961 |
| Slapy | 3 × 48 | 1955 |
| Štěchovice I | 2 × 11,25 | 1944 |
| Vrané | 2 × 6,94 | 1936 |

Vodní elektrárny je možné třídit podle různých hledisek. Podle velikosti instalovaného výkonu se rozlišují na malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 10 MW, dále střední vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 10 MW do 200 MW a třetí skupinou jsou velké vodní elektrárny s instalovaným výkonem nad 200 MW [25]. Vzhledem k technicky využitelnému hydroenergetickému potenciálu toků a možnostem při výběru lokalit se jako nejschůdnější cesta rozvoje vodní energetiky ČR jeví budování malých vodních elektráren. V Tab. 1.5 jsou MVE rozděleny podle instalovaného výkonu [25].

Tab. 1.5 Dělení MVE podle instalovaného výkonu [25]

| Vodní elektrárny | Instalovaný výkon |
|-----------------------------|--------------------------|
| Domácí vodní elektrárny | do 35 kW |
| Vodní mikroeletřárny | od 35 kW do 100 kW |
| Vodní minielektrárny | od 100 kW do 1 MW |
| Průmyslové vodní elektrárny | 1 MW do 10 MW |

Malé vodní elektrárny lze rozdělit podle velikosti spádu, pro nízkotlaké elektrárny je spád určen do 20 m, pro středotlaké od 20 m do 100 m a vysokotlaké elektrárny využívají spád větší jak 100 m. [25]

Kvůli vodním elektrárnám dostává krajina jiný ráz a dochází k pozměnění ekosystémů. Elektrárny mají vedle energetického i vodohospodářský význam. Kromě průtokových vodních elektráren patří mezi nejznámější typy vodních elektráren elektrárny akumulární. Jsou součástí vodních děl - nádrží. Tato vodní díla kromě akumulace vody pro výrobu elektrické energie stabilizují průtoky říčním korytem, chrání před povodňovými vlnami a podporují ekonomicky výhodné plavební možnosti vodních toků. [2]

2 CÍL PRÁCE A METODA ŘEŠENÍ

Cílem práce je vypracování studie návrhu vodní elektrárny se Zotlötererovou vírovou turbínou na řece Oslavě v lokalitě Pilský jez v 35,797 km. Návrh MVE je vypracován na základě snahy o využití hydroenergetického potenciálu v dané lokalitě za účelem výroby elektrické energie z obnovitelného zdroje.

Přijatá metoda řešení se skládá z rekognoskace Pilského jezu, sběru podkladových dat, analýzy energetické využitelnosti Pilského jezu, rešerše použitelnosti turbín v dané lokalitě, rešerše informací o Zötlötererově vírové turbíně, návrhu vodní elektrárny a zhodnocení navrženého řešení.

3 ROZDĚLENÍ VODNÍCH TURBÍN

Vodní turbína je točivý mechanický stroj, který přeměňuje kinetickou či tlakovou energii vody na mechanickou energii. Mechanickou energii dále převádí generátor na elektrickou energii [15].

3.1 ROZDĚLENÍ Z HLEDISKA ZPŮSOBU PŘENOSU ENERGIE

Turbíny, u nichž se celá tlaková energie vody přeměňuje v přívodu vody před oběžným kolem na energii kinetickou, která je využívána v oběžném kole, nazýváme *rovnotlaké (akční)*. Tyto turbíny mají stejný tlak na vstupu i výstupu oběžného kola. Mezi představitele rovnotlakých turbín patří Peltonova turbína.

U *přetlakových (reakčních)* turbín se mění pouze část tlakové energie vody na kinetickou. Při výtoku z kanálů oběžného kola se část tlakové energie mění v kinetickou (pohybovou) energii a tím dochází ke zmenšování hydrostatického tlaku od vtoku k odtoku. Mezi přetlakové turbíny patří turbíny Kaplanovy a Francisovy. [15, 25]

3.2 ROZDĚLENÍ Z HLEDISKA POLOHY HŘÍDELE

Turbíny se rozdělují z hlediska polohy hřídele na *horizontální*, což jsou především velké přímoproudé turbíny, *vertikální* kam spadá většina turbín kromě přímoproudých a na *šikmé* přímoproudé Kaplanovy turbíny. [15, 25]

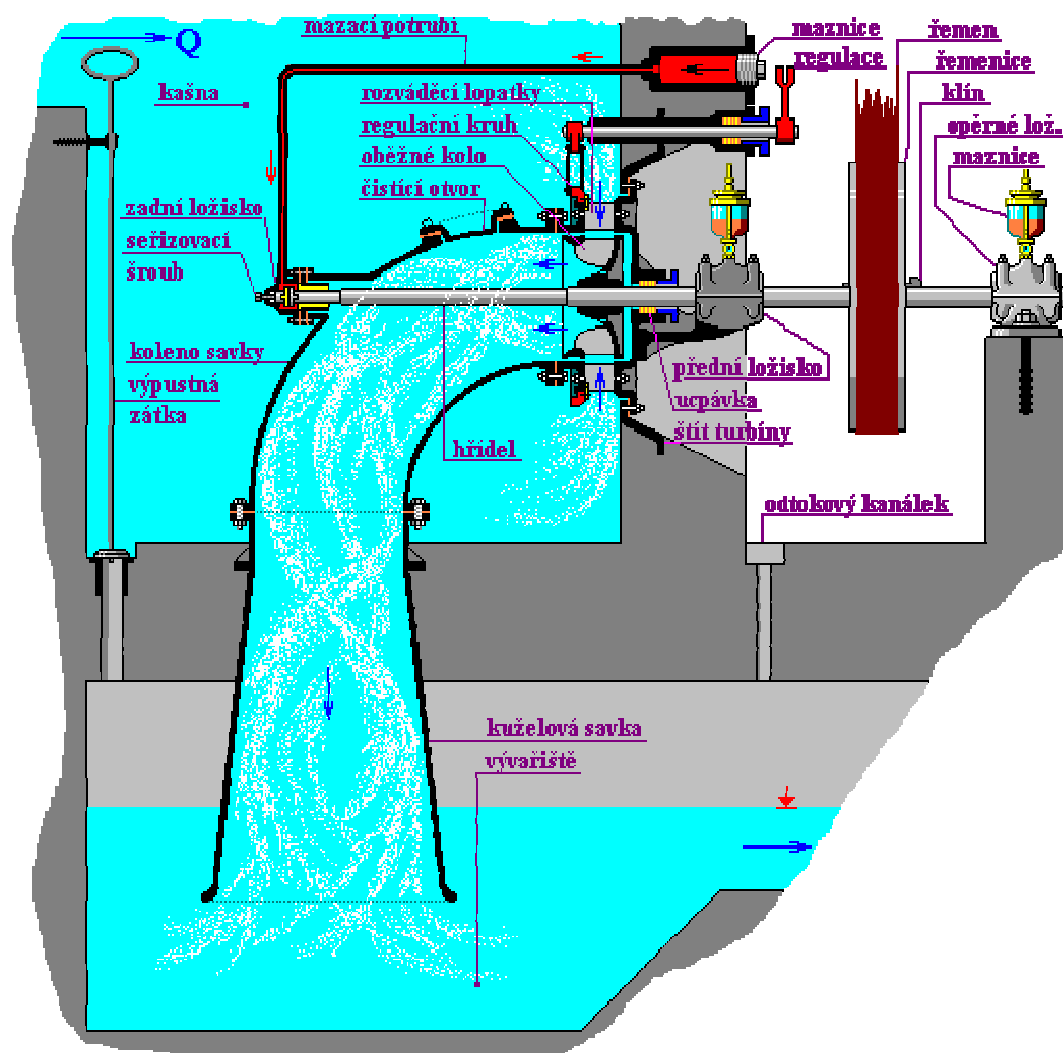
3.3 ROZDĚLENÍ PODLE ORIENTACE PROUDĚNÍ

Turbíny se rozdělují podle směru protékající vody oběžným kolem vzhledem k hřídeli turbíny. Pokud je směr proudění přibližně rovnoběžný s osou rotace hřídele, nazývá se *axiální*, (např. Kaplanova turbína). *Radiální* turbína umožňuje protékání vody oběžným kolem kolmo ke hřídeli. Pokud vodní proud s vnějším vtokem vody směřuje ke hřídeli, nazývá se *centripetální*, když voda protéká oběžným kolem s vnitřním tokem směrem od hřídele, mluví se o *centrifugální* turbíně. Mění-li se proudění vody v oběžném kole z axiálního na radiální nebo naopak, nazývá se *radiálně axiální*. O *diagonální* turbíně se mluví, když směr proudění v oběžném kole je šikmý ke hřídeli (např. Deriazova turbína). V případě, že na oběžné kolo působí proud vody v tečném (tangenciálním) směru, pak se nazývá *tangenciální* turbínou (např. Peltonova turbína). [25]

3.4 JEDNOTLIVÉ TYPY VODNÍCH TURBÍN

Francisova turbína

Je jedna z nejrozšířenějších turbín. Rozděluje se podle uložení hřídele na vertikální a horizontální. Patří mezi přetlakové. Voda vtéká profilem s rozváděcím kolem s natáčecími lopatkami do profilu oběžného kola, které má lopatky pevné. Při změně výkonu turbíny se přivírají pouze rozváděcí lopatky, takže voda vtéká do profilu oběžného kola pod nevhodným úhlem a naráží na pevné lopatky. Při změně průtoku rychle klesá účinnost turbíny. Vhodná je proto v případech, kde je konstantní průtok a spád [10]. Turbína může být umístěna ve stěně turbínové kašny naplněné vodou. Voda vtéká po celém obvodu turbíny přes rozváděcí lopatky, kde získává voda rychlost a potřebný směr pro vstup do profilu oběžného kola. V profilu oběžného kola voda předává energii oběžnému kolu a pomocí kolenové savky odtéká. Pokud se vede koleno savky uvnitř kašny, mluví se o mokré savce (Obr. 3.1), pokud koleno prochází strojovnou, mluví se o suché savce. [16]



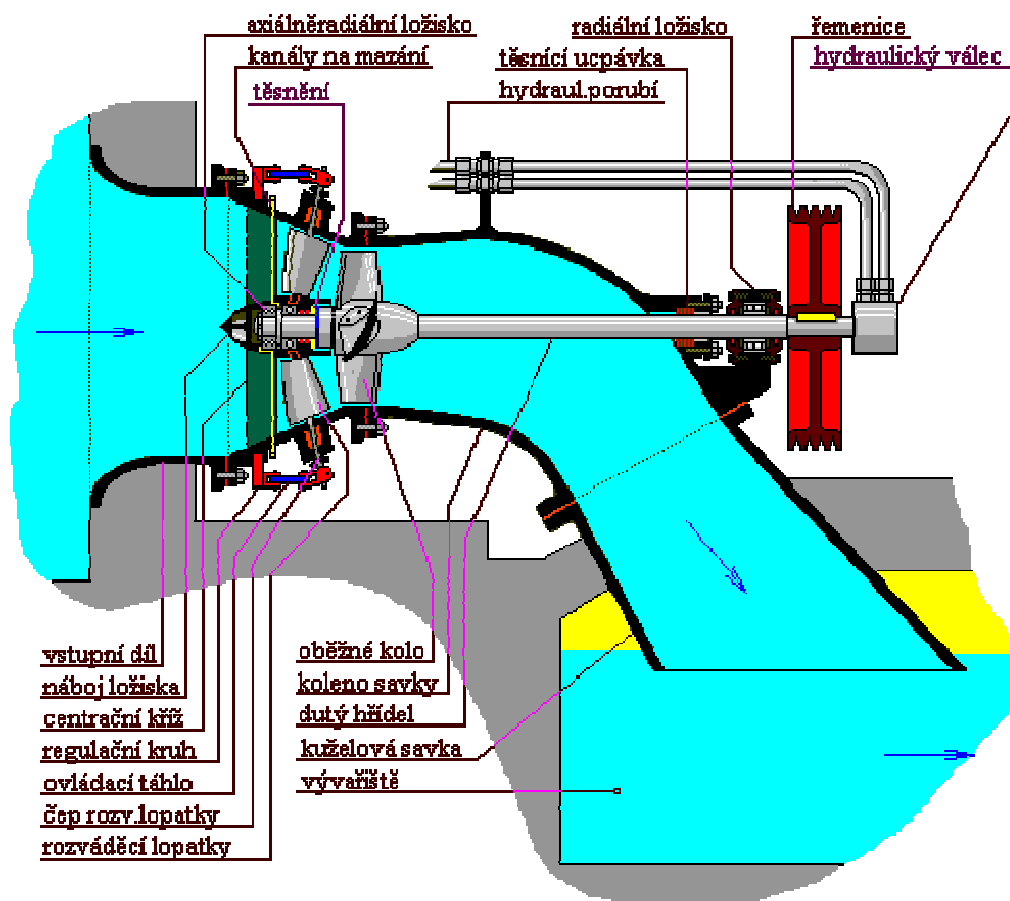
Obr. 3.1 Schéma Francisovy horizontální turbíny s mokrou savkou [16]

Kaplanova turbína

Charakteristickým rysem Kaplanovy turbíny je možnost plynulé změny úhlu nastavení lopatek oběžného kola za provozu v závislosti na velikosti požadovaného výkonu turbíny při současné odpovídající změně otevření přiváděče. Variantami Kaplanovy turbíny jsou Thomannova turbína (s regulovatelným oběžným kolem a pevným rozváděčem) a propelerová (vrtulová) turbína (s pevnými lopatkami oběžného kola a regulovatelným rozváděčem) a přímoproudá turbína. Nejčastějšími typy konstrukčního uspořádání přímoproudých turbín jsou s obtékaným generátorem, s generátorem v šachtě, s protékaným generátorem, s vnějším generátorem (propojení řemenovým nebo kuželovým převodem, přímé vyvedení hřídele mimo turbínu tzv. S-turbíny). [25]

Kaplanova S-turbína (Obr. 3.2) se nejčastěji používá v malospádových vodních elektrárnách. Jedná se o horizontální turbínu s esovitě tvarovanou savkou. Výhodou jsou nízké náklady na stavební část, nepotřebuje speciální konstrukce, kašnu ani hluboké odpadní koryto. Tvoří kompaktní technologický blok. Pro malou stavební výšku ji lze instalovat do jezových pilířů a malých strojoven u jezových elektráren. Nevýhodou u turbín s dvojitou regulací je značná mechanická složitost a následná vysoká pořizovací cena a vyšší náklady na údržbu. Adekvátní místo pro Kaplanovu S-turbínu je lokalita, která má během roku výrazně rozkolísaný průtok, kde by použití jiných turbín s jednoduchou regulací bylo neekonomické. [16]

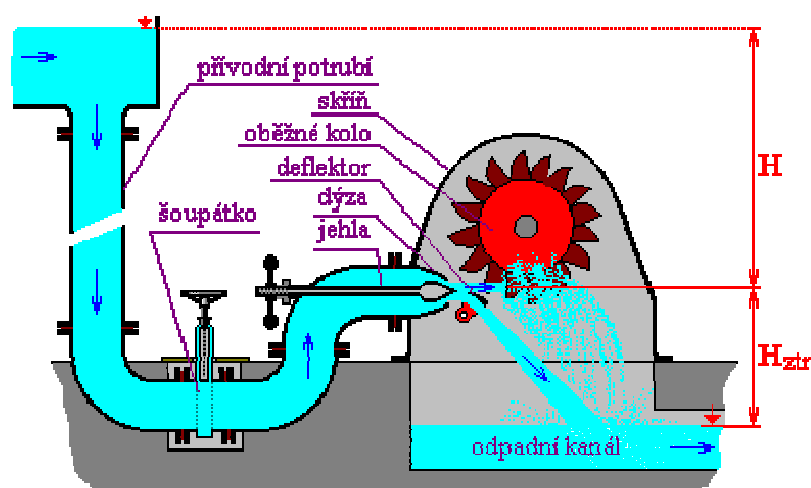
Turbína je přes přírubu spojena s přechodovým kusem, který zajišťuje přívod vody. Voda vtéká do difuzoru stroje, který se kuželovitě zužuje, následně se rychlost zvyšuje. Dále míjí centrační kříž a vstupuje mezi lopatky. Proud vody je lopatkami upraven na požadovaný směr a rychlost před vstupem do profilu oběžného kola. Rychlost vody v profilu oběžného kola je nejvyšší, nachází se v nejužším průřezu celého stroje. Oběžné kolo má sudý počet lopatek, nejčastěji čtyři. Voda opouští oběžné kolo se značnou zbytkovou energií, kterou savka transformuje na zápornou tlakovou energii, tím zaručí průtok vody strojem. [16]



Obr. 3.2 Schéma Kaplanovy S-turbíny [16]

Peltonova turbína

Patří mezi rovnotlaké turbíny s parciálním a tangenciálním ostřikem. Pomocí kruhového potrubí je voda přivedena k turbíně, které vede k jedné nebo více dýzám. V dýze se tlaková energie vody přetransformuje do pohybové energie. Voda vstupuje tangenciálně do oběžného kola osazeného lžícovými lopatkami. Proud vody je rozdělen na dvě poloviny a předává energii oběžnému kolu. Přenesením energie se kolo roztáčí a voda opouští lopatky na vnější straně s minimální rychlostí a volně odtéká z oběžného kola ven a padá do odpadu pod turbínou. Plně je využitý spád " H " zobrazen na Obr. 3.3. Výškový rozdíl " H_{ztr} " je ztracený a energeticky nevyužitý. [16]

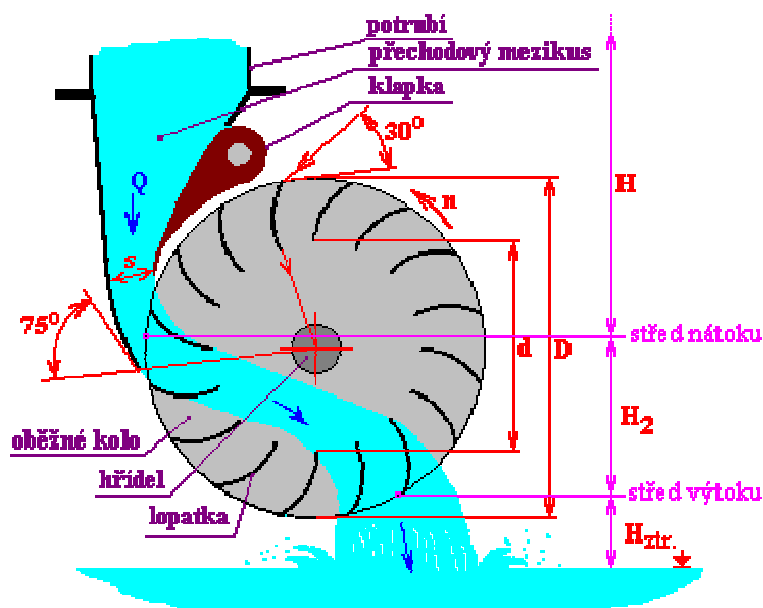


Obr. 3.3 Schéma Peltonovy turbíny [16]

Používá se tam, kde je třeba zpracovat malý průtok při velkém spádu. Velmi příznivě okysličuje vodu. Je snadno a rychle ovladatelná. Peltonovu turbínu lze použít i pro pitnou vodu, protože ložiska jsou umístěna mimo vodu a neznečišťují ji. [16]

Bánkiho turbína

Jedná se o jednoduchou rovnotlakou turbínu. Využití má u malých vodních elektráren. Oběžné kolo tvoří dvě kruhové desky, mezi nimi jsou uloženy jednoduché lopatky. Lopatky oběžného kola jsou obtékány ve dvou směrech. Usměrněný proud vody z jedné strany přitéká do skříně. Voda dále prochází přes lopatky dovnitř kola a následně přes lopatky vytéká ven na druhé straně skříně. Obr. 3.4 ukazuje schéma Bánkiho turbíny. Bánkiho turbína je velmi oblíbená, protože se dá zhotovit s dobrou účinností i amatérsky. [3]



Obr. 3.4 Schéma Bánkiho turbíny [16]

Vírová turbína Františka Pochylého

Vírová turbína vyvinutá týmem na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně pod vedením prof. Ing. Františka Pochylého, CSc. vychází z opačného hydraulického principu než konvenční turbíny. Na rozdíl od např. Kaplanovy turbíny, kde je přiváděn proud kapaliny na oběžné kolo turbíny rozrotovaný pomocí spirály a rozvaděče, je nátok na oběžné kolo vírové turbíny přímý a kapalina rotuje za turbínou v obráceném směru než je smysl rotace oběžného kola. Vírová turbína dosahuje vysoké účinnosti při nízkých nákladech, protože stroj nevyžaduje rozvaděč, převodovku či frekvenční měnič a výroba oběžného kola je nenákladná ve srovnání např. s Kaplanovou turbínou. Kinematika oběžného kola vírové turbíny umožňuje otáčky stroje nastavit na frekvenci elektrické sítě. [30, 31]

Vírová turbína je navržena pro malé výkony, řádově kilowatty, dále pro malé spády, 1-3 m v případě dvoustupňové variantě 1-5 m a pro velké průtoky.

Existuje celá řada variant stroje, např.:

- Dvoustupňová
- Vírová turbína s nastavitelným úhlem lopat
- Násoskové nebo přímoproudé provedení.

V průběhu posledního desetiletí došlo k několika instalacím stroje na reálných dílech, z posledních lze jmenovat malou vodní elektrárnu Želina. Vírová turbína zde pracuje v jednostupňovém násoskovém provedení na spádu 1,9 - 2,4 m s průtokem 2 m³/s. Instalovány jsou dva stroje s celkovým instalovaným výkonem 2 × 14,5 kW. Při optimálním provozu je dosažena účinnost stroje až 85 %. Vírová turbína je nadále předmětem vývoje a výzkumu na Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana na Fakultě strojního inženýrství na VUT v Brně. [30]

Zotlötererova turbína

Tato turbína je podrobně popsána v následující kapitole 4 ZOTLÖTEREROVA VÍROVÁ TURBÍNA.

Následující tabulka (Tab. 3.1) shrnuje výše uvedené typy vodních turbín a jejich vlastnosti.

Tab. 3.1 Přehled typů vodních turbín a jejich vlastnosti [4, 11, 12, 13, 17, 30, 31]

| Druh turbíny | Tlak | Spád | Průtok | Účinnost | Výkon |
|---------------|-------------|--------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|
| | | [m] | [m ³ /s] | [%] | [MW] |
| Francisova | přetlaková | 50–400 ^[17] | 2–800 ^[17] | ~90 ^[12] | do 800 ^[17] |
| Kaplanova | přetlaková | ~40 ^[17] | ~1000 ^[17] | ~90 ^[12] | do 200 ^[17] |
| Peltonova | rovnostlaká | 300–1500 ^[17] | 0,5–20 ^[17] | 80–95 ^[12] | do 200 ^[17] |
| Bánkiho | rovnostlaká | 1–200 ^[4] | 0,005–9 ^[4] | 78–84 ^[4] | do 1 ^[12] |
| Pochylého | přetlaková | 1–5 ^[30] | od 0,2 ^[30] | až 85 ^[30] | 0,0045–0,043 ^[13] |
| Zotlötererova | přetlaková | 0,5–2,0 ^[11] | do 20 ^[11] | 70–80 ^[11] | 0,0002–0,04 ^[11] |

4 ZOTLÖTEREROVA VÍROVÁ TURBÍNA

Na řekách existuje mnoho míst, které se pro malý spád hladin nedaly využít, protože pro ně nebyla vhodná turbína. Až v roce 2003 vynalezl Rakušan Franz Zotlöterer vírovou turbínu, na kterou obdržel rakouský patent. Roku 2007 získal švýcarský patent. Zotlötererova turbína umožňuje využití velmi malých spádů od 0,5 m do 2 m, na které nelze použít běžné typy vodních turbín. Využívá průtoků až do 20 m³/s, při větších průtocích lze zapojit několik turbín v paralelním režimu. [11]

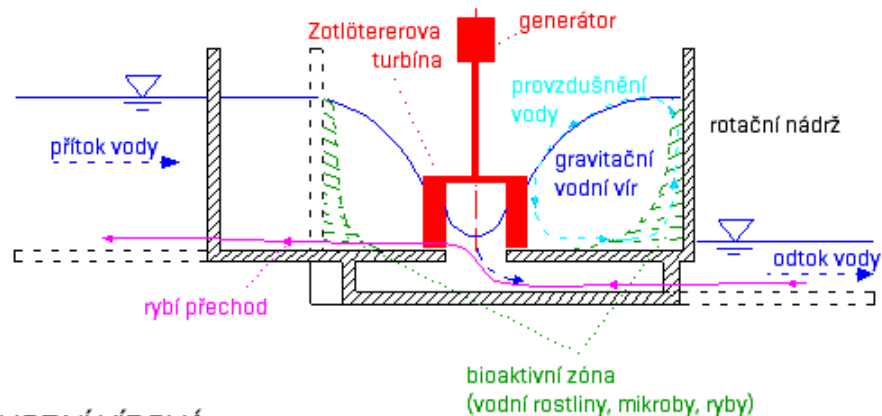
Princip elektrárny se Zotlötererovou vírovou turbínou je velmi jednoduchý. Ve vtokové části voda protéká přes hrubé česle, kde se zachytí větší části splavenin. Poté voda vtéká do válcové nádrže, kde začíná kroužit podél vnější strany nádrže, tím vytváří vodní vír. Čím blíže se voda přibližuje ke středu, tím dosahuje větší rychlosti. Proud vody naráží na lopatky turbíny a roztáčí tak hřídel generátoru, který je umístěn nad středem válcové nádrže. Následně voda odtéká ze středu válcové nádrže výtokovým otvorem ve dně a vtéká do odpadního kanálu, který je zaústěný do řeky.

Na Obr. 4.1 je v první části zobrazen podélný řez gravitační vodní vírové elektrárny a v druhé části její půdorys.

Betonová konstrukce se skládá z 3 hlavních částí: z přivaděče, válcové nádrže s výtokovým otvorem ve dně v její ose a odpadu. Hlavní části doplňují pomocné betonové konstrukce.

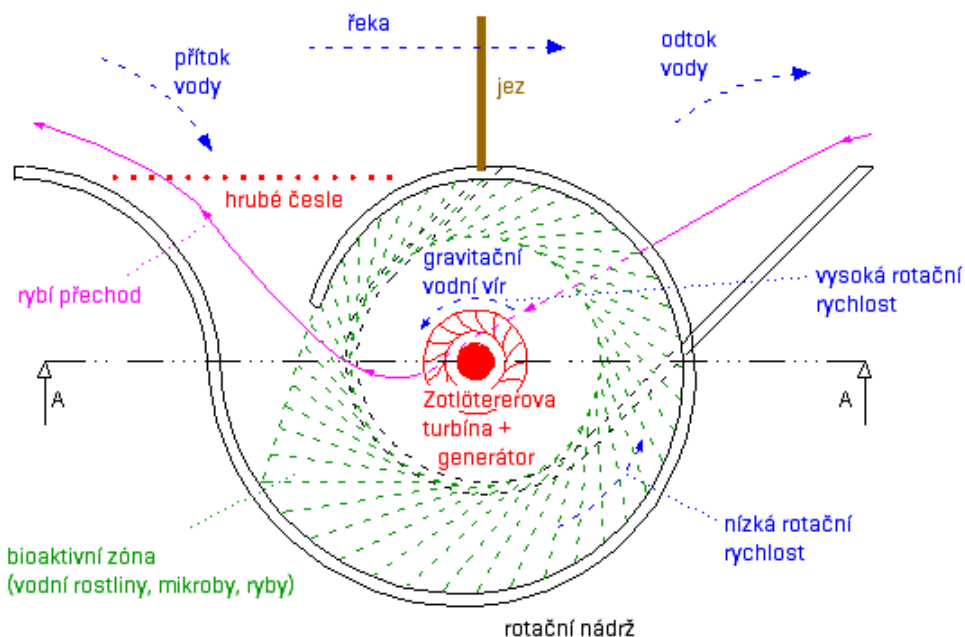
Z důvodu zvýšení účinnosti se válcová nádrž postupným vývojem změnila na spirálovou nádrž.

podélný řez A-A



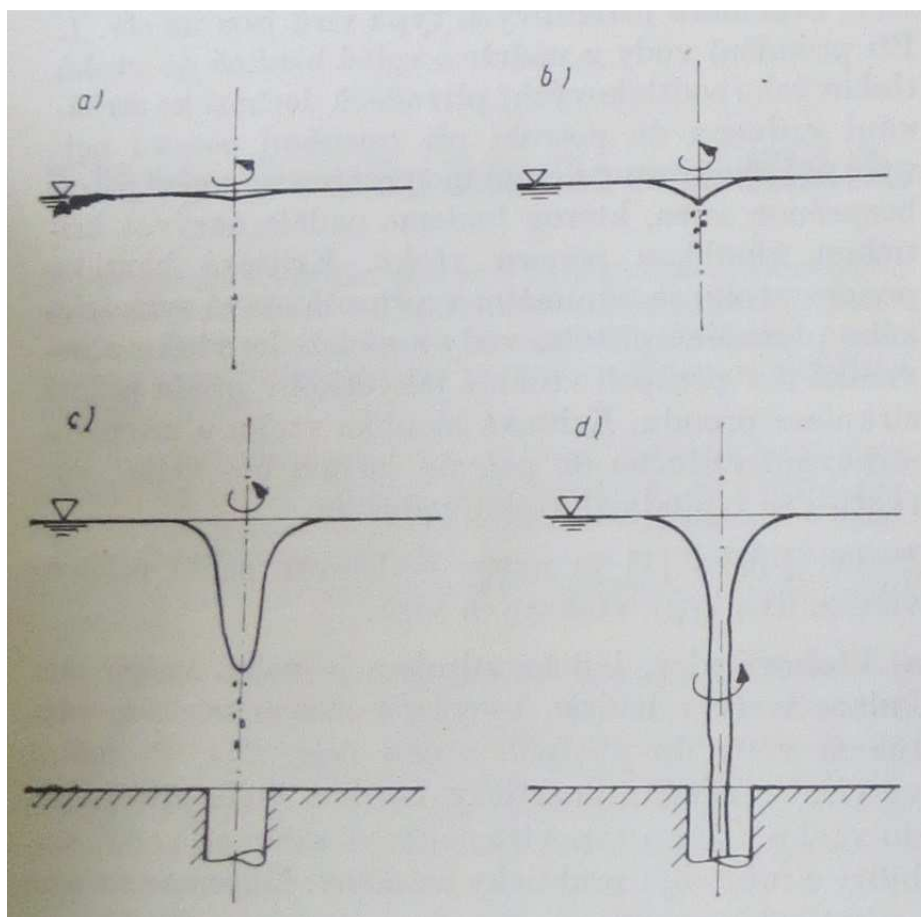
GRAVITAČNÍ VODNÍ VÍROVÁ ELEKTRÁRNA

půdorys



Obr. 4.1 Schéma gravitační vodní vírové elektrárny se Zotlötererovou turbínou

V časopise vodní hospodářství Skalička [28] popisuje vznik vodních vtokových vírů, jejich vlastnosti a nepříznivé účinky, které vyvolávají. Na Obr. 4.2 je znázorněno dělení vodních vírů i jejich tvar. Níže je vysvětleno k čemu na Obr. 4.2 dochází.



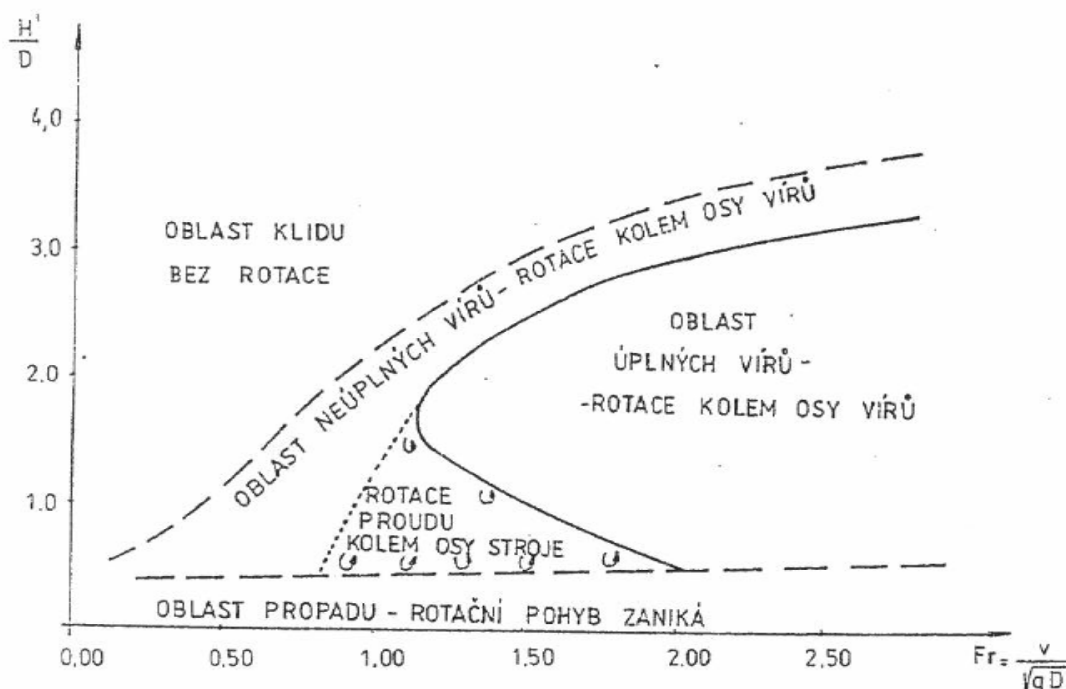
Obr. 4.2 Základní typy vtokových vírů [28]

- a) Hladinový vír. Projevuje se krouživým pohybem vody zvláště u hladiny a jejím mírným zvlněním. V ose víru se někdy u hladiny objeví malé vzduchové bubliny. [28]
- b) Vírový důlek. Při krouživém pohybu vody se na hladině občas vytvoří malý kuželovitý vírový důlek. Strhávání bublin vzduchu z hladiny do hloubky je nepatrné a bubliny se vracejí zpět k hladině. [28]
- c) Neúplný nálevkový vír. Vytváří se nálevka se vzduchovým jádrem. Vzduch je strháván směrem ke vtoku ve formě bublinek, které se s růstem hloubky zmenšují. Bublínky vzduchu se převážně vracejí zpět k hladině. U přechodného typu k úplnému víru vytváří bublinky pod vzduchovým jádrem víru tenký (vláknový) řetězec, který proniká až do vtoku, takže jen část bublin se vrací ve formě mlhy zpět k hladině. [28]

d) Úplný nálevkový vír. Vytváří se hluboká nálevka se souvislým vzduchovým jádrem, kterým je vzduch intenzivně strháván do vtoku. [28]

U vírové elektrárny dochází k úplnému nálevkovému víru, před stádiem propadu, kdy ustává rotační pohyb.

V roce 1992 Šulc publikoval svoji práci, kde se zabýval stanovením minimální provozní hladiny turbíny v kašně. Během laboratorních zkoušek přišel k několika závěrům. Jedním ze závěrů je, že poslední stadium úplného vtokového víru přechází snižováním hladiny do stavu, kdy vzniká při hloubce H_p deformace hladiny – propad. V tomto případě zaniká klasický rotační pohyb hladiny charakteristický pro všechna vírová stadia. U propadu značně stoupá množství vzduchu pohlceného proudem, odhaduje se asi na 30–50 % průtoku. Experimentální zkoušky byly prováděny v rozsahu Froudova čísla $Fr = 0,5$ až 2,75. U kašnových turbin s vertikální osou se mohou vyskytnout dvě relativně oddělené oblasti tvorby vírů. V kašně větších rozměrů s nižšími rychlostmi možno nalézt pro jistý průtok dvě rozmezí hloubek, při nichž dojde k výskytu úplných vírů. Tato rozmezí jsou oddělena oblastí vzniku vírů nižších intenzit. Uvedené oblasti jsou patrné z grafů na Obr. 4.3. [29]



Obr. 4.3 Schematické rozdělení oblastí dle charakteru proudění na hladině v kašně vertikálních turbin [29]

4.1 PŘIVADĚČ

Elektrárnu je třeba vhodně situovat do proudu, aby nedocházelo k velkým hydraulickým ztrátám. Přivaděč je beztlakový s volnou hladinou. Jsou zde umístěny hrubé česle, které zachytí velké plovoucí a vznášející se předměty a zabrání jejich vniknutí do válcové nádrže a případnému poničení lopatek turbíny. Nad česlemi je vybudována lávka, která slouží k jejich čištění. V přivaděči je nutné umístit drážky provizorního hrazení, aby byla zajištěna možnost odstavení elektrárny v případě oprav. [11]

4.2 NÁDRŽ

Voda přitéká přivaděčem do nádrže, začíná kroužit podél vnější stěny, dochází ke vzniku víru, čím blíže je středovému otvoru, tím dosahuje vyšší rychlosti, nakonec voda s nejvyšší rychlostí naráží na lopatky turbíny, kterým předává značnou část své energie, následně odtéká otvorem, který se nachází ve dně. K optimálnímu charakteru rotačního pohybu v nádobě dochází při dodržení poměru d/D mezi hodnotami 0,14 až 0,18. [20] Veličina d označuje průměr otvoru ve dně nádrže a veličina D označuje průměr válcové nádrže.

4.3 ODPAD

Odpadní kanál je umístěn pod nádrží. Jsou zde umístěny drážky provizorního hrazení dolní vody pro možné opravy elektrárny.

4.4 PROVOZ

Provoz elektrárny může být nepřetržitý. Pro uvedení do provozu není nutné přivedení elektrické energie ze sítě. Při provozu není potřeba nepřetržitého dohledu. Hrubé česle jsou obvykle čištěné ručně, proto je nutná pravidelná kontrola a čištění.

4.5 TYPIZACE

Firma Zotlöterer smart energy systems nabízí možnost konzultace, návržení MVE i samotnou realizaci projektu. V Tab. 4.1 jsou uvedeny typy turbín vyráběných firmou Zotlöterer smart energy systems. [11]

Tab. 4.1 Typy vyráběných turbín [11]

| Typ turbíny | Spád | Průtok | Průměr nádrže |
|-------------|------|---------------------|---------------|
| | [m] | [m ³ /s] | [m] |
| 1 kW-GWVPP | 0,8 | 0,25 | 3 |
| 5 kW-GWVPP | 1,2 | 0,7 | 4,5 |
| 10 kW-GWVPP | 1,5 | 10,2 | 6,0 |
| 20 kW-GWVPP | 1,7 | 2,0 | 9,0 |
| 30 kW-GWVPP | 2,0 | 2,7 | 11,5 |

Konstrukce, na které je turbína zavěšena, je složena ze dvou ocelových nosníků U profilů. Nosníky jsou uloženy a zajištěny na horní hraně nádrže. Na nosnících je připevněn generátor, který předává vyrobenou energii do elektrické rozvodné skříně. Toto uložení je znázorněno na Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Uložení turbíny a generátoru na nosné konstrukci [11]

4.6 VÝHODY A NEVÝHODY

Mezi výhody vodní elektrárny se Zotlötererovou vírovou turbínou patří menší náročnost v oblasti montáže a servisu oproti ostatním typům elektráren. Nepotřebuje velké a drahé regulační systémy, obsahuje minimum pohyblivých částí, u kterých dochází k opotřebení. Postačí minimální údržba. Turbína umožňuje průchod menších předmětů, proto nejsou potřeba jemné česle. Může být použita jako rybí přechod produkující elektrickou energii. [11]

Návratnost investice bývá v kratší době po instalaci oproti použití jiných typů turbín ve stejných podmínkách.

Stěny a dno nádrže vytváří nový druh bioreaktoru, kde se usazují vodní rostliny, mikroby a drobné ryby. Vodní rostliny jsou regenerační biologické filtry, které touto vlastností přispívají k čištění protékající vody. Nachází se zde generace mikrobů a ryb tvořící společenství kolem vodních rostlin. Důležitý faktor, který umožňuje migraci ryb v obou směrech proudění bez větší námahy, je malá hodnota průřezové rychlosti. Malá rychlost zajišťuje bezrizikový průchod pro ryby. Na rozdíl od jiných typů rybích přechodů, kde proudí menší část z celkového průtoku, zde ryby snadno naleznou vstup do odpadního kanálu. [11]

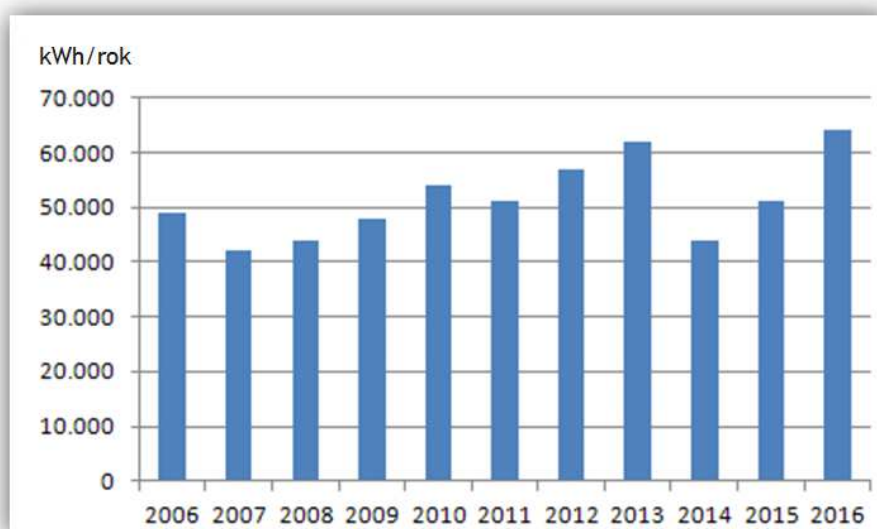
Mezi nevýhody vodní elektrárny se Zotlötererovou vírovou turbínou v porovnání s Francisovou a Kaplanovou turbínou patří malý rozsah použitelnosti co do průtoku a spádu. V případě většího spádu a větších průtoků lze sestavit více jednotek do modulového systému. Další nevýhodou je nižší účinnost v porovnání s již zmíněnými turbínami. Účinnost se zlepšuje postupným vývojem tvaru turbíny. Náročnější tvar však může znamenat vyšší pořizovací cenu, čímž se ztrácí výhoda rychlé návratnosti.

4.7 PŘÍKLADY POUŽITÍ

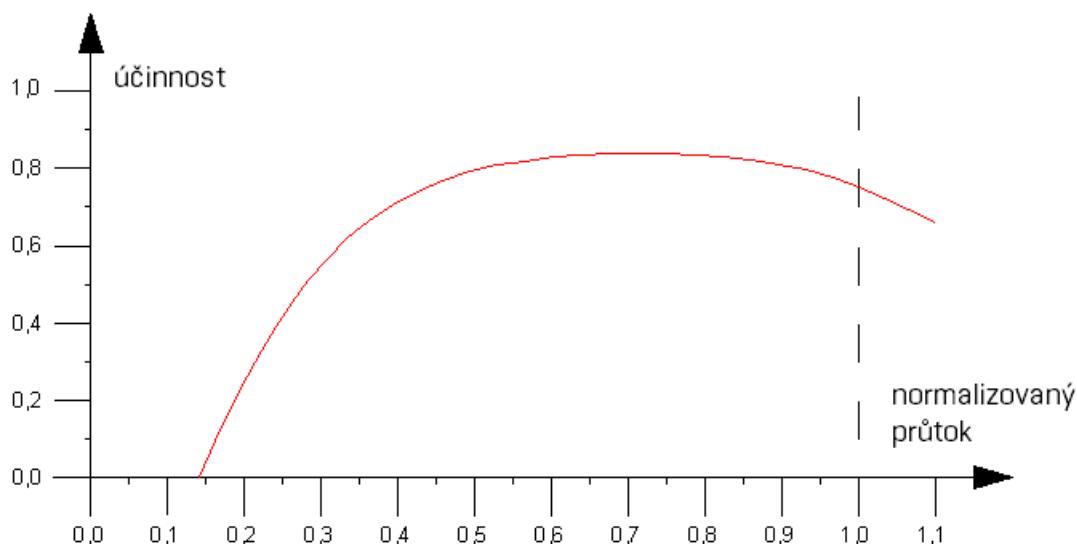
4.7.1 MVE v Dolním Rakousku

V Dolním Rakousku v Obergrafendorfu u St. Pölten funguje u vodního toku Pielach od února 2006 první elektrárna se Zotlötererovou vírovou turbínou. Od té doby dodává do veřejné elektrické sítě každý rok průměrně 55 MWh elektrické energie. Přibližnou roční produkci energie ilustruje Obr. 4.5. Se svým průměrem válcové nádrže 5,5 m a instalovaným elektrickým výkonem 7,5 kW se řadí spíše k menším instalacím. Tato

elektrárna pracuje s maximálním spádem 1,5 m a maximální průtok činí 0,9 m³/s. Autorem udávaná účinnost turbíny 80 % při plném výkonu se při zmenšujícím se průtoku mírně zvětšuje, při dalším zmenšení průtoku na 1/3 maxima pak je 64. Účinnost použité turbíny je znázorněna na Obr. 4.6. Rychlost této turbíny je 33 otáček za minutu. Období úředního schválení a rozhodnutí povolení k provozu trvalo 4 měsíce a investiční náklady na vybudování tohoto díla činily přibližně 1,70 mil. Kč (60 000 €, přepočteno průměrným kurzem eura v roce 2006, který činil 28,343 Kč/€). [1, 11]



Obr. 4.5 Roční produkce energie pilotní elektrárny v Obergrafendorfu [27]



Obr. 4.6 Účinnost vírové turbíny elektrárny v Obergrafendorfu [27]

4.7.2 MVE ve Švýcarsku

Dalším z projektů výstavby vírových vodních elektráren je stavba prototypu elektrárny firmy GWWK v rámci projektu SWISS ECO-ENERGIEPARK AARGAU ve švýcarském městečku Schöftland v kantonu Aargau, která byla zprovozněna roku 2011. Tato elektrárna s jednoduchou turbínou (Obr. 4.7) má instalovaný elektrický výkon 15 kW, průměr nádrže 6,5 m a maximální spád 1,5 m. Ročně vyprodukuje 80–130 MWh energie. [22]



Obr. 4.7 Turbína vodní elektrárny v Schöftlandu [35]

4.7.3 MVE v Indonésii

Příkladem možností realizace v rozvojových zemích je stavba elektrárny v rámci projektu Green School na ostrově Bali v Indonésii. Tato elektrárna s průtokem $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ a spádem 1,5 m má instalovaný generátor o výkonu 15 kW. Na Obr. 4.8 je fotografie z realizace projektu. [34]



Obr. 4.8 Elektrárna v Indonésii [24]

Zotlöterer dále prezentuje řadu referenčních staveb elektráren s instalovaným elektrickým výkonem 3,3–18 kWh, spádem 0,9–1,8 m a průtokem 0,5–2 m³/s. Na některých realizacích je zde předvedena univerzálnost systému, kdy lze vírovou elektrárnu použít jako modulární systém pro větší spád (Obr. 4.9) nebo větší průtok (vedle sebe postavené elektrárny se stejnou výškou hladiny vody, Obr. 4.10), případně jako přímá součást jezu (Obr. 4.11). [24]



Obr. 4.9 Dvě za sebou ustavené elektrárny s různou výškou hladiny vody [24]

V případě většího spádu, lze postavit dvě za sebou ustavené elektrárny s různou výškou hladiny vody. Na Obr. 4.9 je stanoven spád 2 × 1,4 m, s průtokem 0,5 m³/s a instalovaným výkonem 2 × 4 kW. [24]



Obr. 4.10 Vedle sebe postavené elektrárny se stejnou výškou hladiny vody [24]

Při větším průtoku, je možné postavit vedle sebe dvě i více vírových elektráren nezávisle pracujících na sobě. V tomto případě jsou zde dvě elektrárny se spádem 0,9 m, s průtokem $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ na každou elektrárnu a s instalovaným výkonem 3,3 kW na jednu elektrárnu. [24]



Obr. 4.11 Elektrárna jako přímá součást jezu [24]

Na Obr. 4.11 je elektrárna navržena pro spád 1 m, průtok $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ a instalovaný výkon 4,6 kW. Dále jsou tyto vírové elektrárny postaveny v Irsku a v Itálii. V Irsku s největším instalovaným výkonem 40 kW a v Itálii s výkonem 6 kW. Na Obr. 4.12 jsou fotografie z výstavby. [27]



Obr. 4.12 Výstavba elektrárny v Irsku s výkonem 40 kW [27]

V Tab. 4.2 jsou uvedeny tři vybudované vodní vírové elektrárny ve světě.

Tab. 4.2 Přehled uvedených příkladů vírových elektráren

| Místo | Průměr válcové nádrže | Spád | Průtok | Účinnost | Instalovaný výkon |
|-------------------|-----------------------------|------|---------------------|----------|----------------------|
| | [m] | [m] | [m ³ /s] | [%] | [kW] |
| Dolní Rakousko | 5,5 | 1,5 | 0,9 | 80 | 7,5 |
| Švýcarsko | 6,5 | 1,5 | - | - | 15 |
| Indonésie | - | 1,5 | 1,2 | - | 15 |

5 NÁVRH VODNÍ ELEKTRÁRNY PILSKÝ JEZ

5.1 CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉ LOKALITY

5.1.1 Správní údaje

Zájmová lokalita se nachází v intravilánu obce Náměšť nad Oslavou v Kraji Vysočina. Městem protéká řeka Oslava (Obr. 5.1). Pílský jez byl vybudován na řece Oslavě v 35,680 km.

| | |
|-------------------------------|---|
| Název obce: | Náměšť nad Oslavou |
| Kraj: | Kraj Vysočina |
| Okres: | Třebíč |
| Obec s rozšířenou působností: | Náměšť nad Oslavou |
| Katastrální území: | Náměšť nad Oslavou |
| Kód katastrálního území: | 701564 |
| Kód obce: | 591211 |
| Katastrální výměra: | 18,7 km ² |
| Nadmořská výška: | 365 m n. m. |
| Souřadnice: | 49,217°N, 16,150°E |
| Počet obyvatel: | 5013 |
| Adresa obecního úřadu: | Náměšť nad Oslavou Masarykovo nám. 104 675 71 Náměšť nad Oslavou |
| Název vodního toku: | Oslava |
| Správa toku: | Povodí Moravy, s. p., Dřevařská 11, 602 00 Brno Závod Dyje, Husova 760, 675 71 Náměšť nad Oslavou |
| Číslo vodohospodářské mapy: | 24-31 |
| Číslo hydrologického pořadí: | 4-16-02-001 |



Obr. 5.1 Znázornění polohy Pílského jezu [26]

5.1.2 Geologické údaje

Náměštsko je tvořeno krystalickými břidlicemi, které jsou místy proniknuty hlubinnými a žilnými vyvřelinami. Západní část je tvořena durbachitem třebíčsko-meziříčského masívu a silně přeměněnými horninami moldanubika, tvořenými granulitem, angibolitem, hadcem a rulami. Východní část je tvořena méně přeměnnými rulami, fylity a vápenci moravika. Mezi moldanubikem a moravikem probíhá pásmo svorů a dvojslídnych rul. Do hornin jsou hluboce zaříznuta údolí řek Oslavy, Chvojnice a Jihlavy vytvářející místy meandry. [19]

Drsnost koryta byla stanovena na základě zrnitosti na daném úseku řeky. Dále byl vypočten podle Stricklerova vztahu

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{21,1}, \quad (5.1)$$

d_{50} je průměr zrna odpovídající 50% čáry zrnitosti, součinitel drsnosti svahu 0,041 a dna 0,035.

5.1.3 Hydrologické údaje

Hydrologické údaje byly vypočteny z nejbližších hlásných profilů Velké Meziříčí a Oslavany [7]. Řada M-denních průtoků použitých ve výpočtu se vztahuje k referenčnímu

období 1980–2010 [18]. Průměrný roční průtok ve Velkém Meziříčí Q_{aM} je 2,50 m³/s a průměrný roční průtok v Oslavanech Q_{aO} je 3,47 m³/s [7].

Tab. 5.1 M-denní průtoky v Oslavanech [7]

| | | | | | | | | |
|----------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| M | [dny] | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 |
| Q_{Md} | [m ³ /s] | 8,240 | 5,380 | 3,980 | 3,040 | 2,400 | 1,950 | 1,560 |
| M | [dny] | 240 | 270 | 300 | 330 | 355 | 364 | - |
| Q_{Md} | [m ³ /s] | 1,300 | 1,100 | 0,901 | 0,700 | 0,526 | 0,400 | - |

Pro výpočet byly použity následující vztahy. Průměrný roční průtok v Náměšti nad Oslavou Q_{aN} za předpokladu lineární závislosti $Q_a=f(S)$ je

$$Q_{aN} = \frac{(S_N - S_M) \times (Q_{aO} - Q_{aM})}{(S_O - S_M)}, \quad (5.2)$$

kde S_N je plocha povodí Náměště nad Oslavou, S_M je plocha povodí Velkého Meziříčí a S_O je plocha povodí v Oslavanech. Průměrný roční průtok v Náměšti nad Oslavou byl vypočítán 2,89 m³/s.

Ke stanovení M-denních průtoků byl využit stejný podíl C , jako u průměrných ročních průtoků, tedy

$$C = \frac{Q_{aN}}{Q_{aO}}. \quad (5.3)$$

Podíl C byl vypočítán 0,832.

Každý M-denní průtok v Náměšti nad Oslavou Q_{MdN} se vypočítal z M-denního průtoku v Oslavanech Q_{MdO}

$$Q_{MdN} = C \times Q_{MdO}, \quad (5.4)$$

Kde Q_{MdO} je M-denní průtok ve Velkém Meziříčí. Výsledné M-denní průtoky pro profil Pílský jez jsou uvedeny v Tab. 5.2.

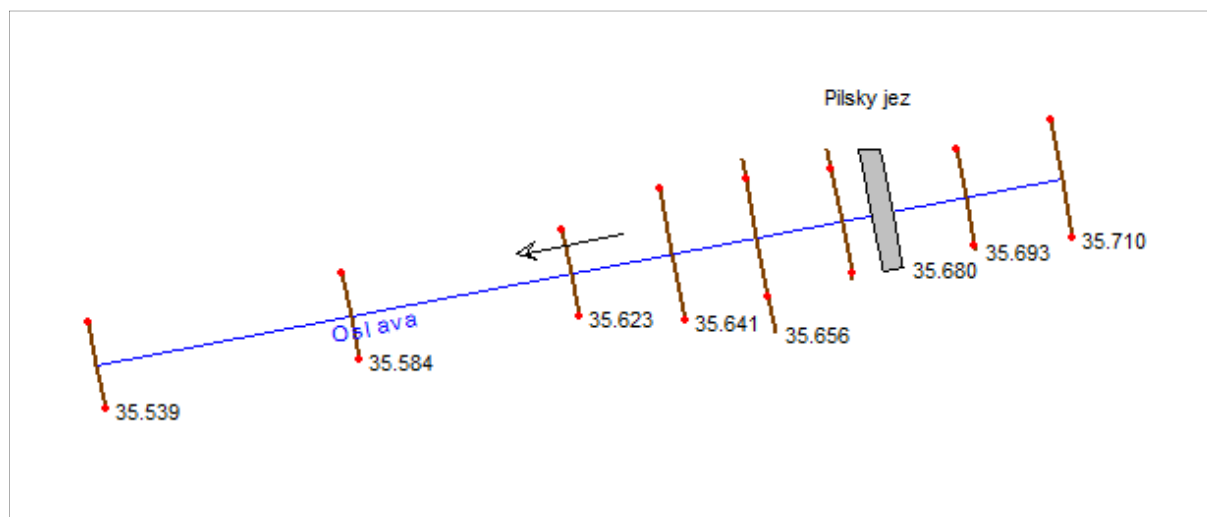
Tab. 5.2 M-denní průtoky v Náměšti nad Oslavou

| | | | | | | | | |
|----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| M | [dny] | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 |
| Q_{Md} | [m³/s] | 6,858 | 4,478 | 3,313 | 2,530 | 1,998 | 1,623 | 1,298 |
| M | [dny] | 240 | 270 | 300 | 330 | 355 | 364 | - |
| Q_{Md} | [m³/s] | 1,082 | 0,916 | 0,750 | 0,583 | 0,438 | 0,333 | - |

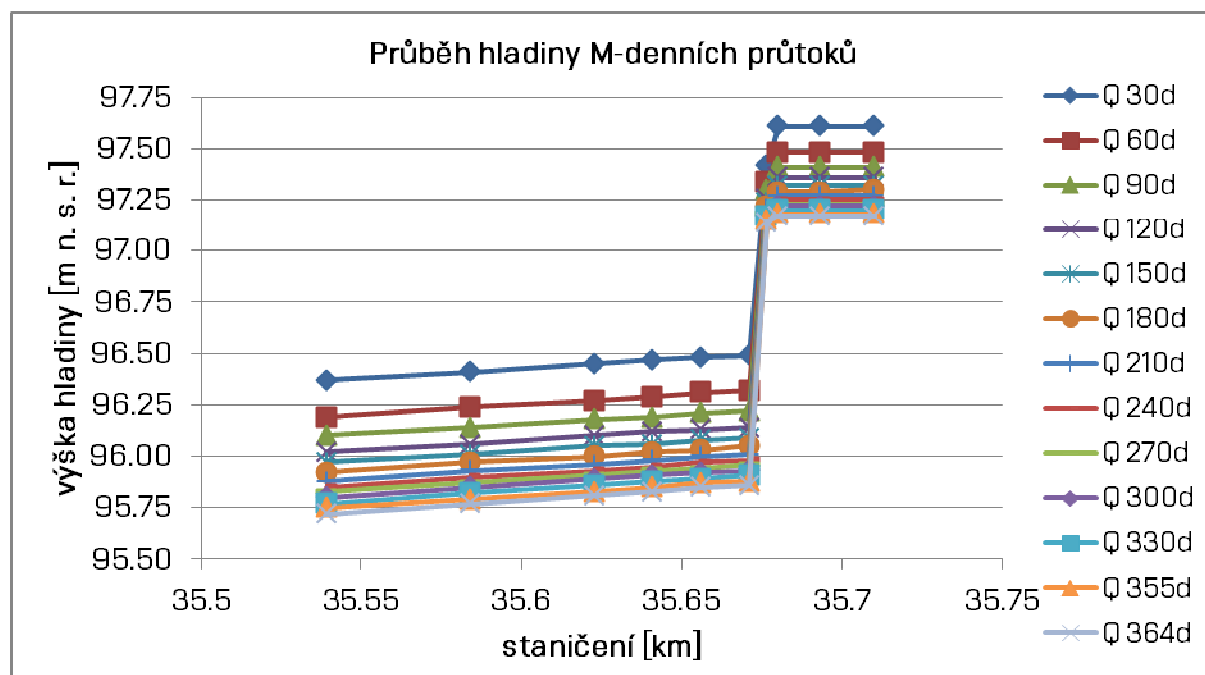
5.1.4 Koryto toku

V řešeném úseku koryta toku v říčním km 35,710 až km 35,539 nedochází k výraznému zakřivení osy toku. Koryto má tvar jednoduchého lichoběžníku se sklonem svahů 1:1,5. Podélný sklon je 1 ‰. Dochází zde k říčnímu proudění.

Proudění v korytě bylo vypočítáno pomocí jednorozměrného numerického modelu v programu HEC–RAS 4.1.0. V řešeném úseku bylo vytvořeno 8 příčných profilů, a vymodelován jez (Obr. 5.2). Řešeny byly ustálené průtoky. Horní okrajovou podmínkou byl průtok a dolní okrajovou podmínkou byla úroveň hladiny při rovnoměrném proudění definovaná tvarem příčného profilu a sklonem. Průběh hladin za stávajícího stavu je uveden na Obr. 5.3, výpočet byl proveden pro řadu M-denních průtoků. Výsledky proudění pod jezem byly využity pro návrh MVE.



Obr. 5.2 Schematická situace výpočtového modelu



Obr. 5.3 Průběh hladin za stávajícího stavu

5.1.5 Stávající stav jezu

Při rekognoskaci stávajícího stavu Pílského jezu byla provedena obchůzka dané lokality a vytvořena fotodokumentace. V minulosti byl u Pílského jezu vybudován náhon. Dnes po tomto náhonu zbylo pouze zanesené a zarostlé koryto. V roce 1980 byla provedená rekonstrukce Pílského jezu, při níž byl vtok do náhonu zaslepen zdí, a koryto náhonu bylo v délce 30 m zasypáno do úrovně okolního terénu. [21]

Jez je vybudován jako pevný jez. Délka přelivné hrany je 12,1 m. Kóta přelivné hrany je v úrovni 97,10 m nad srovnávací rovinou (lokální výškový systém). Jezové těleso je zakončeno železobetonovým jezovým prahem výšky 2,78 m, šířky 1,3 m se sklonem návodního líce 1:1. Součástí jezu je šterková propust, která je umístěná v levé části jezu. Hrazená je stavidlovou tabulí. Šterková propust je od jezu oddělena středním pilířem. Stavidlová tabule je z fošen, které jsou vyztuženy ocelovými pásy. Šířka tabule je 2,0 m a výška je 1,05 m. Dolní hrana stavidlové tabule je ve výšce 96,10 m n. s. r. V místě styku pevné koruny jezu se středním pilířem, je výška přelivné hrany 97,15 m n. s. r. Stavidlová tabule se musí obsluhovat ručně. Jako manipulační lávka pro obsluhu slouží silniční panel s rozměry 3,0 m × 1,0 m, který je umístěn mezi levobřežní opěrnou zdí a středním pilířem. Kóta horní hrany středního pilíře je 100,0 m n. s. r. Střední pilíř má délku 4,2 m a šířku

1,08 m. Levobřežní opěrná zeď je po celé délce zabezpečena zábradlím, v místě vstupu na lávku je zajištěna brankou. Pravý břeh v nadjezí je opevněn dlažbou do betonu. [21]

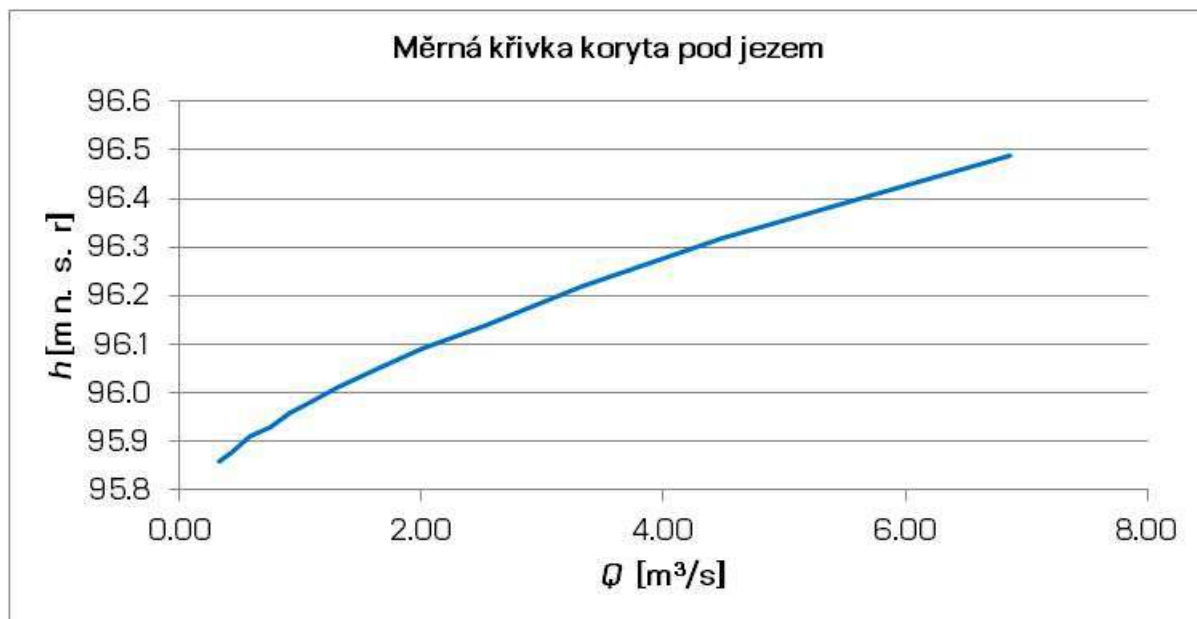
Koryto v podjezí má tvar jednoduchého lichoběžníku s šířkou 12 m ve dně, směrem k jezu se dno rozšiřuje až na 16 m, sklon svahu je 1:1,5. Opevnění je zajištěno záhozovou patkou v patě svahu z lomového kamene do 1,2 m výšky. Svah je opevněn pohozem z hrubého šterku v tl. 0,3 m. Po celém úseku má koryto jednotný sklon 1,0 ‰. Vývar na pravém břehu dosahuje délky 8 m a směrem k levému břehu se prodlužuje na 9 m, hloubka je 0,70 m. Dno vývaru je zpevněno záhozem z lomového kamene váhy do 200 kg s urovnáním líce a prolitím betonem v tloušťce vrstvy 0,5 m, dále je návodní líc vývarového prahu ve sklonu 1:3 v tl. vrstvy 0,7 m, kóta v nejvyšším bodě vývaru je 95,72 m n. s. r. Kóta dna vývaru je 95,02 m n. s. r. Na vývar navazuje opevnění ve tvaru podkovy, jedná se o zához z lomového kamene váhy do 200 kg bez zpevnění betonem. [21]

5.2 HYDROTECHNICKÉ A HYDROENERGETICKÉ VÝPOČTY

5.2.1 Hydrotechnické výpočty

Měrná křivka pod jezem

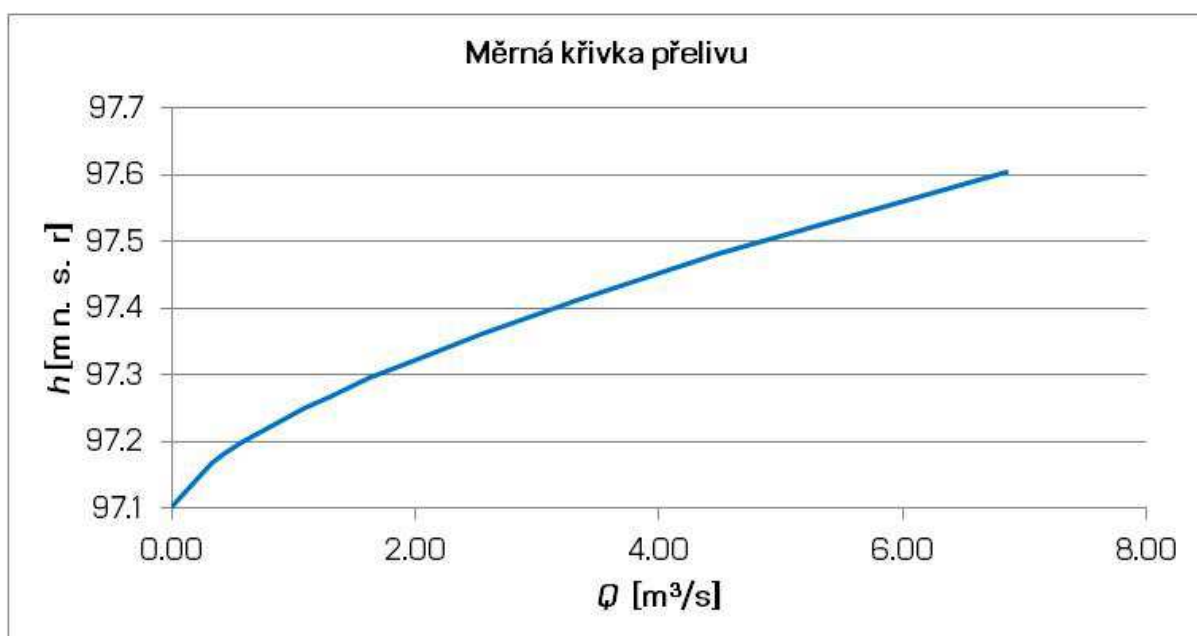
Měrná křivka pod jezem nebyla součástí podkladů. Byla stanovena z průběhu hladin, dle předchozích 1D výpočtů pro zvolené průtoky. Hodnoty průtoků jsou uvedeny v Tab. 5.2. Výpočet byl proveden v programu HEC–RAS 4.1.0 za předpokladu nerovnoměrného ustáleného proudění.



Obr. 5.4 Měrná křivka koryta pod jezem

Měrná křivka přelivu

Pro výpočet měrné křivky byl uvažován lichoběžníkový přeliv obdélníkového příčného profilu. Měrná křivka přelivu byla vypočtena v programu HEC-RAS 4.1.0. Sdružený součinitel přepadu byl uvažován 1,55 [6].



Obr. 5.5 Měrná křivka přelivu

5.2.2 Hydroenergetické výpočty

Hydroenergetické výpočty byly provedeny v aplikaci Microsoft Excel. Nejdříve proběhlo zpracování hydrologických podkladů. Dále se jednalo o zpracování průtoků a spádů. Byl vypočten minimální průtok přepadající přes jez Q_{pmin} daný přepadovou výškou 0,02 m (5.5). Součinitel přepadu m byl uvažován 0,35 a šířka jezu 12,1 m. Počítáme s tíhovým zrychlením g 9,81 m/s². Dále byl stanoven využitelný průtok, odečtením minimálního průtoky přepadajícího přes jez od M-denních průtoků v Náměšti nad Oslavou. Průtok MVE byl nejdříve na základě úrovní hladin odhadnut z Tab. 4.1, ve které jsou uvedeny typy turbín, jejich optimální spád a průtok. Byl vypočten nevyužitý průtok (5.6), který přepadl přes jez. Celkový průtok přepadající přes jez byl stanoven vztahem 5.7. Výsledky byly zpracovány do Tab. 5.3.

$$Q_{pmin} = m \times \sqrt{2g} \times h_p^{\frac{3}{2}} \times b, \quad (5.5)$$

$$Q_{nevyužitý} = Q_{využitelný} - Q_{MVEodhad}, \quad (5.6)$$

$$Q_p = Q_{nevyužitý} - Q_{pmin} \quad (5.7)$$

Výsledný minimální průtok přepadající přes jez Q_{pmin} je 0,053 m/s³.

Tab. 5.3 Dělení průtoku

| m | Q | $Q_{využitelný}$ | $Q_{MVEodhad}$ | $Q_{navyužitý}$ | Q_p |
|-------|--------|------------------|----------------|-----------------|--------|
| [dny] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] | [m³/s] |
| 30 | 6,858 | 6,805 | 0,700 | 6,105 | 6,158 |
| 60 | 4,478 | 4,425 | 0,700 | 3,725 | 3,778 |
| 90 | 3,313 | 3,260 | 0,700 | 2,560 | 2,613 |
| 120 | 2,530 | 2,477 | 0,700 | 1,777 | 1,830 |
| 150 | 1,998 | 1,945 | 0,700 | 1,245 | 1,298 |
| 180 | 1,623 | 1,570 | 0,700 | 0,870 | 0,923 |
| 210 | 1,298 | 1,245 | 0,700 | 0,545 | 0,598 |
| 240 | 1,082 | 1,029 | 0,700 | 0,329 | 0,382 |
| 270 | 0,916 | 0,863 | 0,700 | 0,163 | 0,216 |
| 300 | 0,750 | 0,697 | 0,697 | 0,000 | 0,053 |
| 330 | 0,583 | 0,530 | 0,530 | 0,000 | 0,053 |
| 355 | 0,438 | 0,385 | 0,385 | 0,000 | 0,053 |
| 364 | 0,333 | 0,280 | 0,280 | 0,000 | 0,053 |

Z Tab. 4.1 byly vybrány hodnoty pro 5 W-GWVPP. Spád H_t byl 1,2 m, průtok Q_t 0,7 m³/s a průměr nádrže D byl 4,5 m. Součinitel výtoku C_d byl stanoven hodnotou 0,42. Dále byl vypočítán průměr kruhového otvoru ve dně nádrže d vztahem 5.8. Z předchozího výpočtu byl navržen průměr kruhového otvoru d_k . Bylo ověřeno, zda poměr průměru nádrže D a průměru kruhového otvoru d_k je v optimálním poměru mezi 14-18%. Byla stanovena rychlost proudění v kruhovém otvoru v_d vztahem 5.9. Bylo stanoveno Reynoldsovo kritérium Re vztahem 5.10. Hodnota kinematické viskozity kapaliny ν byla $1,0105 \times 10^{-6}$. Při hodnotě Reynoldsova kritéria bylo zjištěno, že dochází k turbulentnímu režimu proudění. Bylo stanoveno Froudovo kritérium Fr podle vztahu 5.11.

$$d = \sqrt{\frac{4 \times Q}{\pi \times C d \times \sqrt{(2g \times H_t)}}}, \quad (5.8)$$

$$v_d = \frac{Q}{\frac{\pi \times d_N^2}{4}}, \quad (5.9)$$

$$Re = \frac{v_d \times d_N}{\nu}, \quad (5.10)$$

$$Fr = \frac{v_d}{\sqrt{g \times d_N}}. \quad (5.11)$$

Průměr kruhového otvoru ve dně nádrže d byl vypočítán 0,66 m, návrh otvoru d_N byl stanoven 0,66 m. Oprimální poměr D/d_N stanovena 14,7 %. Rychlost proudění v kruhovém otvoru v_d byla vypočtena 2,05 m/s. Reynoldsovo kritériu Re bylo 1 350 406 a Froudovo kritérium Fr bylo 0,804.

Návrh přivaděče byl vypočten následujícími vztahy. Výška prahu y_{prahu} byla stanovena 0,2 m, normá stěna y_{normas} byla 0,3 m zanořená pod hladinu stálého vzduť jezem. Rychlost proudění v byla 0,5 m/s. Šířka nátoku na česlích $b_{nátokč}$ byla 5,08 m. Byla stanovena výška nátoku $a_{nátok}$ podle vztahu 5.12. Výška hladiny stálého vzduť h_{sv} byla 1,23 m. Stanovení šířky přivaděče $b_{př}$ bylo podle vztahu 5.13. Průměr česlic byl 0,05 m, vzdálenost mezi česlicemi 0,15 m, poměr průměru česlic a vzdálenosti byl označen k . Tvar česlic β byl 1,79. Součinitel ztrát na vtoku $\xi_{nátok}$ byl 0,5. Byla stanovena rychlost na vtoku $v_{nátok}$ ze vztahu 5.14. Výsledná ztráta na vtoku $h_{z,nátok}$ byla vypočtena vztahem 5.15.

$$a_{nátok} = h_{sv} - y_{prahu} - y_{normas}, \quad (5.12)$$

$$b_{př} = \frac{Q_{MVEodhad}}{a_{nátok} \times v}, \quad (5.13)$$

$$v_{nátok} = \frac{Q_{MVEodhad}}{b_{nátok} \times a_{nátok}}, \quad (5.14)$$

$$h_{z,nátok} = \left(\beta \times \sqrt[3]{k^4} + \xi_{nátok} \right) \times \frac{v_{nátok}^2}{2g}. \quad (5.15)$$

Výška nátoku $a_{\text{nátok}}$ byla 0,73 m, šířka přivaděče $b_{\text{př}}$ byla 1,92 m. Rychlost proudění $v_{\text{nátok}}$ a výsledná ztráta na vtoku $h_{z,\text{nátok}}$ jsou uvedeny v Tab. 5.4.

Šířka odpadního koryta b_{odtok} byla 3,54 m a výška odpadního koryta a_{odtok} byla 0,4 m. Součinitel ztrát na odtoku ξ_{odtok} byl 1. Byla stanovena rychlost odtoku v_{odtok} ze vztahu 5.16. Výsledná ztráta odtoku $h_{z,\text{odtok}}$ byla vypočtena vztahem 5.17.

$$v_{\text{odtok}} = \frac{Q_{MVEodhad}}{b_{\text{odtok}} \times a_{\text{odtok}}}, \quad (5.16)$$

$$h_{z,\text{odtok}} = \xi_{\text{odtok}} \times \frac{v_{\text{odtok}}^2}{2g}. \quad (5.17)$$

Výsledné hodnoty v_{odtok} a $h_{z,\text{odtok}}$ jsou uvedeny v Tab. 5.4.

Hrubý spád H_h byl vypočten z rozdílu hladiny v nadjezí a hladiny v podjezí (5.18). Čistý spád H byl stanoven ze vztahu 5.19. Průtok MVE Q_{MVE} byl vypočten vztahem 5.20. Účinnost turbíny η byla stanovena z Obr. 4.6. Hustota vody ρ byla uvažována 1000 kg/m³. Výkon turbíny P byl stanoven vztahem 5.21. Teoreticky vyrobená energie E v čase t [den] byla stanovena vztahem 5.22.

$$H_h = Z_{h,h} - Z_{h,d} \quad (5.18)$$

$$H = H_h - h_{z,\text{nátok}} - h_{z,\text{odtok}}, \quad (5.19)$$

$$Q_{MVE} = Cd \times \pi \times \frac{d_N^2}{4} \times \sqrt{2gH} \quad (5.20)$$

$$P = \eta \times g \times \rho \times H \times Q_{MVE}, \quad (5.21)$$

$$E = P \times t \times 24 \times 60 \times 60, \quad (5.22)$$

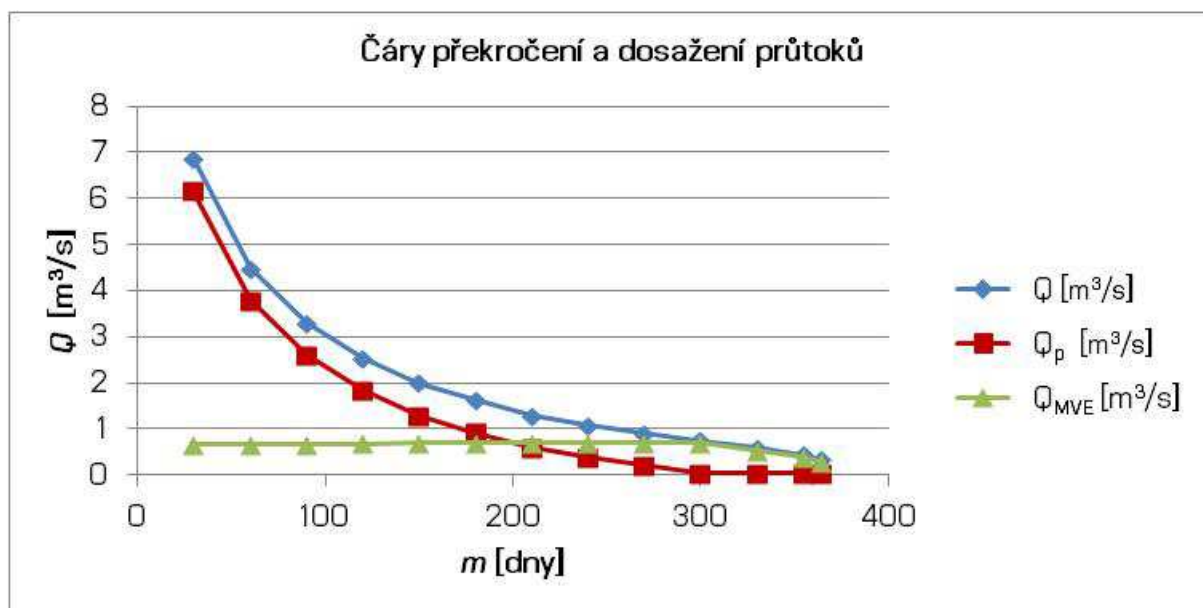
V Tab. 5.5 jsou uvedeny úrovně hladiny vody v nadjezí $Z_{h,h}$, úrovně hladiny vody v podjezí $Z_{h,d}$. Hrubý spád H_h , čistý spád H , účinnost turbíny η , výkon turbíny P a teoreticky vyrobená energie E . Na Obr. 5.6 jsou uvedeny čáry překročení průtoků. Na Obr. 5.7 jsou uvedeny čáry spádů a na Obr. 5.8 je uveden výkon turbíny a teoreticky vyrobená energie.

Tab. 5.4 Rychlosti proudění a ztráty MVE

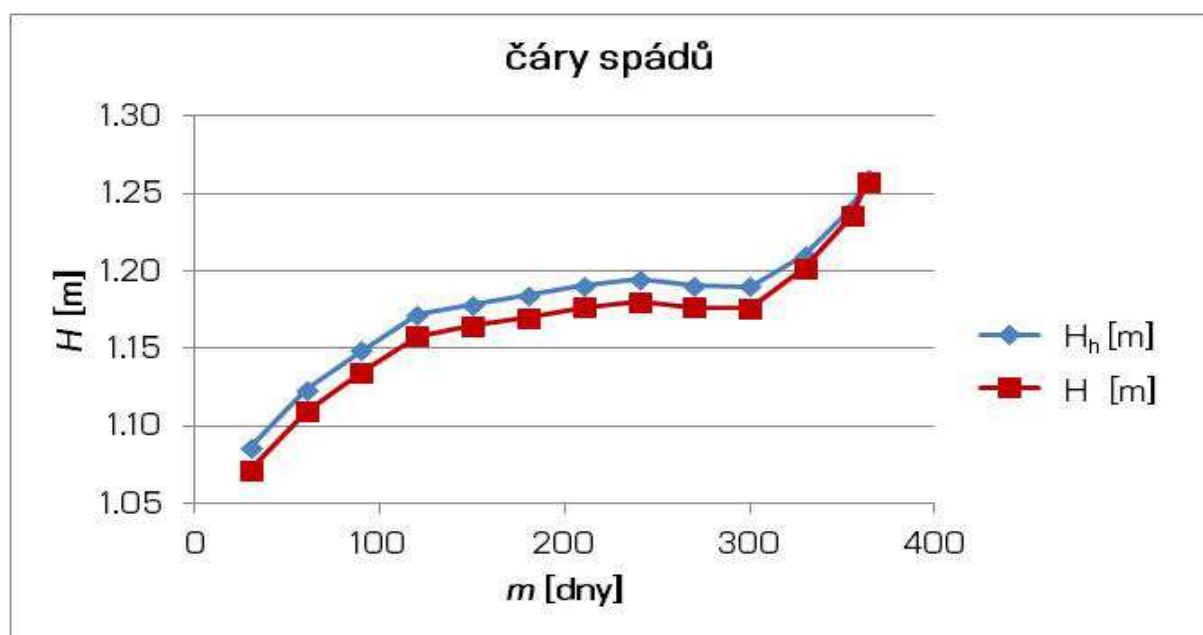
| m | $V_{n\acute{a}tok}$ | $h_{z,n\acute{a}tok}$ | V_{odtok} | $h_{z,odtok}$ |
|-------|---------------------|-----------------------|-------------|---------------|
| [dny] | [m/s] | [m] | [m/s] | [m] |
| 30 | 0,189 | 0,0017 | 0,494 | 0,0125 |
| 60 | 0,189 | 0,0017 | 0,494 | 0,0125 |
| 90 | 0,189 | 0,0017 | 0,494 | 0,0125 |
| 120 | 0,189 | 0,0017 | 0,494 | 0,0125 |
| 150 | 0,189 | 0,0017 | 0,494 | 0,0125 |
| 180 | 0,189 | 0,0017 | 0,494 | 0,0125 |
| 210 | 0,189 | 0,0017 | 0,494 | 0,0125 |
| 240 | 0,189 | 0,0017 | 0,494 | 0,0125 |
| 270 | 0,189 | 0,0017 | 0,494 | 0,0125 |
| 300 | 0,188 | 0,0016 | 0,492 | 0,0123 |
| 330 | 0,143 | 0,0009 | 0,374 | 0,0071 |
| 355 | 0,104 | 0,0005 | 0,272 | 0,0038 |
| 364 | 0,075 | 0,0003 | 0,198 | 0,0020 |

Tab. 5.5 Hladiny vody, čistý spád, účinnost, výkon a vyrobená energie

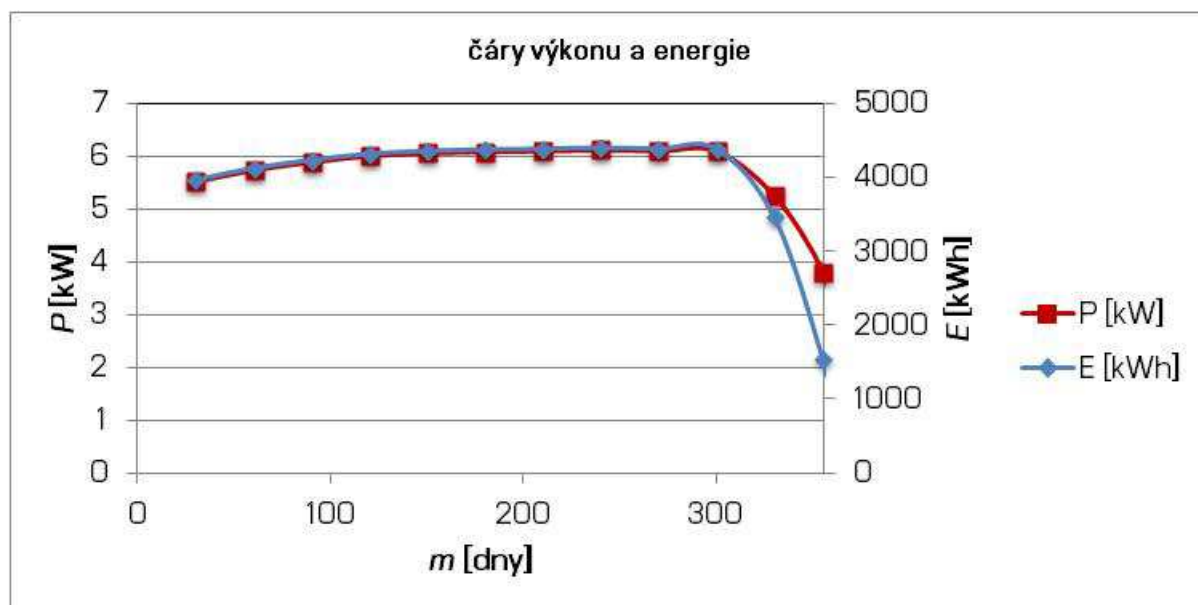
| m | $Z_{h,h}$ | $Z_{h,d}$ | H_h | H | η | P | E |
|-------|--------------|--------------|-------|------|--------|------|-------|
| [dny] | [m n. s. r.] | [m n. s. r.] | [m] | [m] | | [kW] | [kWh] |
| 30 | 97,58 | 96,49 | 1,09 | 1,07 | 0,796 | 5,51 | 3971 |
| 60 | 97,44 | 96,32 | 1,12 | 1,11 | 0,786 | 5,74 | 4129 |
| 90 | 97,37 | 96,22 | 1,15 | 1,13 | 0,780 | 5,89 | 4238 |
| 120 | 97,31 | 96,14 | 1,17 | 1,16 | 0,772 | 6,01 | 4324 |
| 150 | 97,27 | 96,09 | 1,18 | 1,16 | 0,772 | 6,06 | 4361 |
| 180 | 97,23 | 96,05 | 1,18 | 1,17 | 0,770 | 6,09 | 4382 |
| 210 | 97,20 | 96,01 | 1,19 | 1,18 | 0,765 | 6,09 | 4387 |
| 240 | 97,17 | 95,98 | 1,19 | 1,18 | 0,764 | 6,12 | 4405 |
| 270 | 97,15 | 95,96 | 1,19 | 1,18 | 0,765 | 6,10 | 4390 |
| 300 | 97,12 | 95,93 | 1,19 | 1,18 | 0,758 | 6,09 | 4388 |
| 330 | 97,12 | 95,91 | 1,21 | 1,20 | 0,840 | 5,25 | 3462 |
| 355 | 97,12 | 95,88 | 1,24 | 1,24 | 0,816 | 3,81 | 1553 |
| 364 | 97,12 | 95,86 | 1,26 | 1,26 | 0,712 | 2,46 | 531 |



Obr. 5.6 Čáry překročení a dosažení průtoků



Obr. 5.7 Čáry spádů



Obr. 5.8 Čáry výkonů a energie

5.3 NAVRŽENÉ TECHNICKÉ ŘEŠENÍ VODNÍ ELEKTRÁRNY

Účelem stavby MVE je využití hydroenergetického potenciálu stávajícího Pílského jezu. MVE je navržena na levém břehu řeky Oslavy. Hlavními faktory pro návrh stavby na levém břehu byla dopravní dostupnost, možnost částečného využití náhonu, dostatečný volný prostor pro umístění MVE, výška terénu a šterková propust.

Vzhledem k malému spádu, který běžné turbíny nedokáží s požadovanou účinností využít, byla navržena Zotlötererova vírová turbína 5 kW-GWVPP o průměru nádrže 4,5 m. Turbína pracuje v rozmezí spádu 1,07-1,26 m s průtoky 0,28-0,66 m³/s.

Nátok do přivaděče je veden z nadezí, v místě bývalého náhonu. Vtok je vytvořen v původní levobřežní opěrné zdi, před vtokem jsou umístěny hrubé česle, které jsou vyvedeny k horní hraně opěrné zdi. Ve vtoku je umístěn vtokový práh i norná stěna. V prizmatické části přivaděče je umístěn zdvižný stavidlový uzávěr. Přivaděč je chráněn ocelovým roštem. Nádrž je navržena do tvaru spirály. Ve dně je vytvořen kruhový otvor. Nad otvorem je zavěšena turbína, nad kterou je uložen generátor. Odpadní koryto je navrženo pod nádrží a osa odpadního koryta je kolmá na osu přivaděče.

5.3.1 STAVEBNÍ ČÁST

Stavba MVE je rozdělena na tři části, přivaděč, nádrž a odpad.

Přivaděč

Přivaděč je veden přímo z koryta řeky v nadjezí, v místě bývalého náhonu. Vtok je vytvořen probouráním otvoru cca o šířce 5,7 m a výšce 1,7 m v původní levobřežní opěrné zdi a ze statických a konstrukčních důvodů je zpevněn železobetonovým límcem. Výsledný otvor má rozměry 5,08 m a 0,70 m. Vtokový otvor je vytvořen tak, aby sloužil jako vtokový práh převýšený o 0,2 m nad dno v nadjezí a rovněž i jako norná stěna zanořená o 0,3 m pod hladinu stálého vzduť jezem. Poproudň líc vtokového prahu je ve sklonu 1:4. Mezi vtokovým prahem a korytem přivaděče je vytvořena dilatační spára s těsněním. Vtokový práh slouží k zabráněni pohybu dnových splavenin do přivaděče a norná stěna slouží k zabráněni vniku pláví do přivaděče. Před vtokovým otvorem jsou umístěny hrubé česle, které jsou ukotveny do původní opěrné zdi. Rozteč česlic je 0,15 m, průměr česlic je 0,05 m. Přivaděč je z železobetonu a má obdélníkový příčný profil s šířkou 1,92 m a výškou 4,13 m. Jeho délka je 8,18 m. Tloušťka stěn je 0,3 m. Chráněn je ocelovým pochozím roštem s pozinkováním, který je položen na ocelových nosnících profilu I 100 chráněných nátěrem zabraňujícím korozi. Za vtokem v prizmatické části přivaděče je umístěn zdvižný stavidlový uzávěr. Po celé délce přivaděče je vytvořena podkladní vyrovnávací vrstva z betonu o tloušťce 0,10 m.

Nádrž

Nádrž je navržena půdorysně ve tvaru spirály. Při vtoku z přivaděče do nádrže má koryto šířku 1,92 m a výšku 4,13 m. Průměr nádrže v místě nátoku je 4,5 m. Tloušťka stěn je 0,3 m. Kruhový otvor umístěný ve dně nádrže má průměr 0,66 m. Dno nádrže je z železobetonu o tloušťce 0,2 m. Na horní hraně zdi železobetonové nádrže je uložena a ukotvena nosná konstrukce, kterou tvoří dva ocelové nosníky profilu U 200, na které je zavěšena turbína. Hřídel je zajištěna proti vybočení z osy otáčení pojistnou konstrukcí, která se skládá z ocelových nosníků profilu U 100. Nosníky jsou uloženy ve stěně nádrže, ve výšce 1,7 m ode dna nádrže. Všechny kovové konstrukce jsou chráněné nátěrem zabraňujícím korozi.

Odpad

Odpadní koryto je uloženo pod nádrží. Voda vtéká do odpadního koryta kruhovým otvorem s průměrem 0,66 m ve dně nádrže. Odpadní koryto je z železobetonu a má obdélníkový příčný profil s šířkou 3,54 m a výškou 0,4 m. Délka koryta je 5,45 m. Odpadní

koryto má půdorysně zkosené stěny pod nádrží v úhlu 45°. Délka zkosení je 1,25 m, zkosení zasahuje do čtvrtiny šířky odpadního koryta. Tloušťka stěn a dna je 0,3 m. V původní levobřežní opěrné zdi je probourán otvor cca o šířce 4,77 m a výšce 2,0 m. Výsledný otvor z železobetonového límce má šířku 4,08 m a výšku 0,4 m. Mezi původní opěrnou zdí a novou železobetonovou konstrukcí odpadu je dilatační spára. V místě, kde končí nádrž, se mění tloušťka stropní konstrukce z 0,2 m na 0,3 m. Odpadní koryto je zakryto zeminou do původní výšky terénu. Po celé délce odpadního koryta je vytvořena podkladní vyrovnávací vrstva z betonu o tloušťce 0,10 m.

5.3.2 TECHNOLOGICKÁ ČÁST

Dle dostupné literatury byla navržena Zotlötererova vírová turbína 5 kW-GWVPP. Celková účinnost GWVPP závisí na turbíně, geometrii nádrže, převodovce a generátoru. Jmenovitá rychlost turbíny závisí na rozměru GWVPP. Zotlöterer uvádí rychlost 15 až 40 ot./min. Vzhledem k nízké rychlosti turbíny je sníženo riziko poranění ryb. [11]

V práci byl navržen venkovní úložný kabinet, do kterého je uložena veškerá elektroinstalace, Kabinet se nachází v blízkosti nádrže. Elektroinstalace není blíže specifikována.

5.4 VLIV STAVBY NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Vlastní stavba má za účel zlepšit životní prostředí výrobou energie z obnovitelného zdroje. Dochází zde k provzdušňování vodního proudu a tím elektrárna přispívá k zlepšení ekosystému toku. Stavba je umístěna v rekreační oblasti, neomezuje soukromí obyvatelstva. Vzhledem k jednoduchosti výstavby a velikosti MVE se nepočítá se zatížením vnějšího okolí provozním hlukem, či zvýšenou dopravní frekvencí. K místu výstavby MVE je nutné přivést komunikaci. Stavba MVE má pozitivní vliv na životní prostředí, jediným odpadem jsou shrabky z hrubých česlí. V blízkosti hrubých česlí je umístěn kontejner na shrabky. Během výstavby lze očekávat vznik stavebního odpadu. Odpad zachycený na česlích je potřeba nejdříve roztřídit podle druhu a následně s ním naložit v souladu se zákonem o odpadech 185/2001 Sb.

6 ZÁVĚR A HODNOCENÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ

Zadáním bakalářské práce bylo zpracování studie MVE v lokalitě Náměšť nad Oslavou v profilu Pílského jezu s dosud nevyužitým hydroenergetickým potenciálem. Při návrhu bylo přihlíženo k technické proveditelnosti a ekonomické efektivnosti.

Po vyhodnocení vhodných typů turbín, byla vybrána a navržena elektrárna se Zotlötererovou vírovou turbínou, typ 5 kW-GWVPP. Turbína je vhodná pro malé spády, které se v lokalitě Pílského jezu nachází. Nepotřebuje velké a drahé regulační systémy. Další výhodou je minimum pohyblivých částí, u kterých dochází k opotřebení. MVE je navržena jako bezobslužná. Turbína umožňuje průchod menších předmětů, proto jsou zde navrženy pouze hrubé česle. Turbína přispívá i k provzdušnění vody a tím podporuje schopnost samočištění toku. Hlavními faktory pro návrh stavby na levém břehu byla dopravní dostupnost, možnost částečného využití náhonu, dostatečný volný prostor pro umístění MVE, výška terénu a štěrková propust. Při návrhu byl brán ohled na zachování krajinného rázu. Dále byl brán ohled na bezpečnost při pohybu v její blízkosti. Koryto přivaděče je překryto ocelovým pochozím roštem, který zabraňuje nechtěnému vniknutí do přivaděče. Celý objekt je oplocen, tím je zabráněno vniknutí cizí osoby do objektu.

Při návrhu se uvažovalo využít koryto MVE i jako rybí přechod. Pro nízké rychlosti proudění jsou ryby schopné proplout mezi turbínou v obou směrech bez většího rizika poranění. Během výpočtu byla zjištěna vyšší rychlost v kruhovém otvoru ve dně nádrže. V tomto případě nelze uvažovat s MVE i jako s rybím přechodem. Proto je nutné dodatečně navrhnout rybí přechod.

Dle hydroenergetických výpočtů byla stanovena průměrná roční výroba elektrické energie cca 48,52 MWh. V případě nutnosti vybudování rybího přechodu je vhodné stanovit bilanci návratnosti této celkové investice.

7 LITERATURA

1. 90mila kWh da un vortice d'acqua. *Buenobuonogood.com* [online]. 2011 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://buenobuonogood.com/1982/90mila-kwh-da-un-vortice-dacqua/>
2. *Asociace hydroenergetiků ČR* [online]. [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.ahecr.cz/velmi-stabilni-obnovitelny-zdroj-elenergie-mve>
3. *Bánkiho turbína* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.h-union.cz/c-18-bankiho-turbina.html>
4. *Bankiho turbína* [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/primotlaketurbiny/banki.htm>
5. BEDNÁŘ, J. *Turbíny: (malé vodní elektrárny)*. Českovice: Marcela Bednářová, c2013. ISBN 978-80-905437-0-6.
6. *ČSN ISO 4362: Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Měrné přelivy lichoběžníkového průřezu*. Český normalizační institut, c1994.
7. Data_web_1981_2010_prosinec_2016. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/opv/doc/qm.pdf>
8. *Energetický regulační úřad: Roční zprávy o provozu* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/cs/elektrina/statistika-a-sledovani-kvality/rocnizpravy-o-provozu>
9. *Energetika ve světě* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/cisla-a-statistiky/energetika-ve-svete.html>
10. *Francisova turbína* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: http://energyweb.cz/web/schemata/vodni/turbina_francis.htm
11. Gravitation water vortex power plants. *Www.zotloeterer.com* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/>
12. JAHODA, M. *Hydromechanické procesy: Lopatkové stroje* [online]. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/turbiny.cerpadla.pdf>
13. KAPLAN, A. Obnovitelné zdroje: Vírová turbína. *Třípól* [online]. 2012 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/obnovitelne-zdroje/986-virova-turbina>
14. LESCHINGEROVÁ, M. *Energie: Vodní energie* [online]. 2011 [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/vodni-energie/norsko-vyrabi-99-elektriny-ve-vodnich-elektrarnach.aspx>

15. MACHÁT, P. *Vodní turbíny a jejich využití*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Himr.
16. *Malá voda* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/>
17. MANNO, M. *Hydraulic Turbines and Hydroelectric Power Plants* [online]. 2013 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://didattica.uniroma2.it/assets/uploads/corsi/144713/hydro.pdf>
18. M-denní průtoky. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://voda.chmi.cz/opv/data/qm.html>
19. *Mikroregion Náměštsko* [online]. [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://www.namestsko.cz/vegetace-geologie-archeologie/d-1004/p1=1013>.
20. MOHANAN, A. Power Generation with Simultaneous Aeration using a Gravity Vortex Turbine. *International Journal of Scientific & Engineering Research* [online]. 2016 [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://www.ijser.org/researchpaper/Power-Generation-with-Simultaneous-Aeration-using-a-Gravity-Vortex-Turbine.pdf>
21. Oslava km 35,680 Pílský jez – oprava. *Povodí Moravy podnik pro provoz a využití vodních toků Brno, Dřevařská 11*, 1978.
22. Portrait – numbers – facts. *Gwwk.ch* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://gwwk.ch/about/portrait-numbers-facts/>
23. *Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice* [online]. [cit. 2017-02-28]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/dalesice.html>
24. Reference plants. *Www.zotloeterer.com* [online]. [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.zotloeterer.com/welcome/gravitation-water-vortex-power-plants/reference-plants/>
25. ŘÍHA, J a kol. *Hydrotechnické stavby II: modul 2, využití vodní energie*. Brno, 2006.
26. *Server Mapy.cz* [online]. [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <https://www.mapy.cz>
27. *Server Zotlöterer.cz* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.zotloeterer.com/>
28. SKALIČKA, J. Výzkum proudění s vtokovými víry na zmenšených fyzikálních modelech. *Vodní hospodářství*. 1983, **1983a**(1), 7.
29. ŠULC, J. *Stanovení minimální provozní hladiny turbíny v kašně*. Brno, 1992.
30. *Vírová turbína na vodní elektrárně Želina* [online]. Skupina ČEZ [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/5604.html>

31. *Vírová turbína* [online]. Energetický ústav [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: <http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-fluidniho-inzenyrstvi/virova-turbina?lang=1>
32. *Vltavská kaskáda* [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vltavska-kaskada>
33. *Vodní elektrárny ČEZ v České republice* [online]. [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny-cez/ceska-republika.html>
34. Vortex at Green School. *Greenbyjohn.com* [online]. 2015 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://greenbyjohn.com/vortex-at-green-school>
35. *Wasserwirbelkraftwerk: Nachfolger in der Schweiz* [online]. 2011 [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://neulandforum.ch/tell.php/art/26/wasserwirbelkraftwerknachfolgerinderschweiz.html>

8 SEZNAMY

8.1 SEZNAM VELIČIN

| | | |
|---------------|---------------------|---|
| A | [GWh/rok] | hydroenergetický potenciál |
| $a_{nátok}$ | [m] | výška koryta ve vtoku |
| a_{odtok} | [m] | výška odpadního koryta |
| b | [m] | šířka jezu |
| $b_{nátokč}$ | [m] | šířka koryta ve vtoku na česlích |
| b_{odtok} | [m] | šířka odpadního koryta |
| $b_{př}$ | [m] | šířka přivaděče |
| Cd | [-] | součinitel výtoku |
| d_{50} | [mm] | velikost středního zrna |
| d_N | [m] | průměr kruhové nádrže |
| D | [m] | průměr nádrže |
| E | [kWh] | teoreticky vyrobená energie |
| Fr | [-] | Froudovo kritérium |
| g | [m/s ²] | tíhové zrychlení |
| H | [m] | čistý spád |
| H_h | [m] | hrubý spád |
| h_p | [m] | přepadová výška |
| h_{sv} | [m] | hladina stálého vzduší pod jezem |
| H_t | [m] | spád na turbínu |
| $h_{z,nátok}$ | [m] | ztrátová výška ve vtoku |
| $h_{z,odtok}$ | [m] | ztrátová výška odpadního koryta |
| H_{ztr} | [m] | ztracený spád |
| M | [dny] | počet dnů |
| m | [-] | součinitel přepadu |
| n | [-] | drsnost koryta |
| P | [W] | výkon |
| Q_{aM} | [m ³ /s] | průměrný roční průtok ve Velkém Meziříčí |
| Q_{aN} | [m ³ /s] | průměrný roční průtok v Náměšti nad Oslavou |

| | | |
|------------------|---------------------|---|
| Q_{a0} | [m ³ /s] | průměrný roční průtok v Oslavanech |
| Q_{MdN} | [m ³ /s] | průměrný denní průtok v Náměšti nad Oslavou, dosažený nebo překročený po M dní ve zvoleném časovém období |
| Q_{Md0} | [m ³ /s] | průměrný denní průtok v Oslavanech, dosažený nebo překročený po M dní ve zvoleném časovém období |
| Q_{MVE} | [m ³ /s] | průtok přes malou vodní elektrárnu |
| $Q_{MVEodhad}$ | [m ³ /s] | odhadnutý průtok přes malou vodní elektrárnu |
| $Q_{nevyužitý}$ | [m ³ /s] | nevyužitý průtok přepadající přes jez |
| Q_p | [m ³ /s] | průtok přepadající přes jez |
| Q_{pmin} | [m ³ /s] | minimální průtok přepadající přes jez |
| $Q_{využitelný}$ | [m ³ /s] | využitelný průtok |
| Re | [-] | Reynoldsovo kritérium |
| S_M | [m] | plocha povodí Velkého Meziříčí |
| S_N | [m] | plocha povodí Náměště nad Oslavou |
| S_0 | [m] | plocha povodí v Oslavanech |
| v_d | [m/s] | rychlost proudění v kruhovém otvoru |
| $v_{nátok}$ | [m/s] | rychlost proudění ve vtoku |
| v_{odtok} | [m/s] | rychlost proudění v |
| y_{nornas} | [m] | výška norné stěny zanořené pod hladinu stálého vzduť jezem |
| y_{prahu} | [m] | výška prahu |
| $Z_{h,d}$ | [m n. s. r.] | úroveň hladiny toku v nadjezí nad srovnávací rovinou |
| $Z_{h,h}$ | [m n. s. r.] | úroveň hladiny toku v podjezí nad srovnávací rovinou |
| η | [-] | účinnost |
| $\xi_{nátok}$ | [-] | součinitel ztrát na vtoku |
| ξ_{odtok} | [-] | součinitel ztrát na odtoku |

8.2 SEZNAM ZKRATEK

| | |
|----------|---|
| 1D | jednorozměrný |
| ČR | Česká republika |
| GWVPP | gravitation water vertex power plants |
| HEC-RAS | The Hydrologic Engineering Center's River Analysis Systém |
| n. s. r. | nad srovnávací rovinou |
| MVE | Malá vodní elektrárna |
| OECD | Organization for Economic Cooperation and Development |
| ot./min. | počet otáček za minutu |
| s.p. | státní podnik |
| Sb. | Sbírka |
| tl. | tloušťka |
| VUT | Vysoké učení technické |

8.3 SEZNAM TABULEK

| | |
|--|----|
| Tab. 1.1 Rozdělení teoretického hydroenergetického potenciálu Země [5] | 11 |
| Tab. 1.2 Hrubá výroba elektrické energie v České republice [8] | 12 |
| Tab. 1.3 Významné přečerpávací vodní elektrárny v České republice [23] | 12 |
| Tab. 1.4 Významné akumulční a průtočné vodní elektrárny na Vltavě [33] | 13 |
| Tab. 1.5 Dělení MVE podle instalovaného výkonu [25] | 13 |
| Tab. 3.1 Přehled typů vodních turbín a jejich vlastnosti [4, 11, 12, 13, 17, 30, 31] | 23 |
| Tab. 4.1 Typy vyráběných turbín [11] | 29 |
| Tab. 4.2 Přehled uvedených příkladů vírových elektráren..... | 35 |
| Tab. 5.1 M-denní průtoky v Oslavanech [7] | 38 |
| Tab. 5.2 M-denní průtoky v Náměšti nad Oslavou..... | 39 |
| Tab. 5.3 Dělení průtoku..... | 44 |
| Tab. 5.4 Rychlosti proudění a ztráty MVE | 47 |
| Tab. 5.5 Hladiny vody, čistý spád, účinnost, výkon a vyrobená energie..... | 48 |

8.4 SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 3.1 Schéma Francisovy horizontální turbíny s mokrou savkou [16]..... | 18 |
| Obr. 3.2 Schéma Kaplanovy S-turbíny [16] | 20 |
| Obr. 3.3 Schéma Peltonovy turbíny [16]..... | 21 |
| Obr. 3.4 Schéma Bánkiho turbíny [16] | 22 |
| Obr. 4.1 Schéma gravitační vodní vírové elektrárny se Zotlötererovou turbínou | 25 |
| Obr. 4.2 Základní typy vtokových vírů [28] | 26 |
| Obr. 4.3 Schematické rozdělení oblastí dle charakteru proudění na hladině v kašně vertikálních turbin [29] | 27 |
| Obr. 4.4 Uložení turbíny a generátoru na nosné konstrukci [11] | 29 |
| Obr. 4.5 Roční produkce energie pilotní elektrárny v Obergrafendorfu [27]..... | 31 |

| | |
|---|----|
| Obr. 4.6 Účinnost vírové turbíny elektrárny v Obergrafendorfu [27]..... | 31 |
| Obr. 4.7 Turbína vodní elektrárny v Schöftlandu [35]..... | 32 |
| Obr. 4.8 Elektrárna v Indonésii [24]..... | 33 |
| Obr. 4.9 Dvě za sebou ustavené elektrárny s různou výškou hladiny vody [24] | 33 |
| Obr. 4.10 Vedle sebe postavené elektrárny se stejnou výškou hladiny vody [24].. | 34 |
| Obr. 4.11 Elektrárna jako přímá součást jezu [24]..... | 34 |
| Obr. 4.12 Výstavba elektrárny v Irsku s výkonem 40 kW [27] | 35 |
| Obr. 5.1 Znázornění polohy Pilského jezu [26]..... | 37 |
| Obr. 5.2 Schematická situace výpočtového modelu | 39 |
| Obr. 5.3 Průběh hladin za stávajícího stavu..... | 40 |
| Obr. 5.4 Měrná křivka koryta pod jezem..... | 42 |
| Obr. 5.5 Měrná křivka přelivu..... | 42 |
| Obr. 5.6 Čáry překročení a dosažení průtoků | 49 |
| Obr. 5.7 Čáry spádů | 49 |
| Obr. 5.8 Čáry výkonů a energie | 50 |

9 PŘÍLOHY

9.1 FOTODOKUMENTACE

9.2 VÝKRESY

- | | |
|-----------------------------|--------|
| 1. POBROBNÝ SITUAČNÍ VÝKRES | 1 : 50 |
| 2. PODÉLNÝ ŘEZ A-A | 1 : 50 |

FOTODOKUMENTACE



Foto 1 pohled na Pilský jez na řece Oslavě



Foto 2 pohled na středový pilíř a levobřežní opěrnou zeď



Foto 3 pohled na přelivnou hranu jezu



Foto 4 prostor pro příjezdovou komunikaci